



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

Том 12, № 3
2019

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

2019

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Председатель

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН;

Редакционный совет:

Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;

Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор;

Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;

Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;

Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;

Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;

Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Редакционная коллегия:

Ицыксон В.М., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. *Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Prof. Dr. *Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Кучерявый Е.А., канд. техн. наук, профессор, Tampere University of Technology, Finland.

Prof. Dr. *Fa-Long Luo*, Affiliate Full Professor University of Washington, USA, Chief Scientist Micron Technology, Inc., Milpitas, USA, Chairman IEEE SPS Industry DSP Technology Standing Committee;

Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. *Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Прокопенко Н.Н., д-р техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия;

Путря М.Г., д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, Россия;

Пышкин Е.В., канд. техн. наук, доцент, School of Computer Science and Engineering, University of Aizu, Japan;

Трифонов П.В., д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Уткин Л.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Шкодывев В.П., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory», в базах данных Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, Math-Net.Ru, ProQuest, Index Copernicus

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 552-62-16.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019



ST. PETERSBURG STATE
POLYTECHNICAL UNIVERSITY
JOURNAL

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

Vol. 12, No. 3
2019

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

EDITORIAL COUNCIL

Head of the editorial council

Prof. Dr. *Rafael M. Yusupov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences)

Members:

Prof. Dr. *Sergey M. Abramov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Dmitry G. Arseniev*,

Prof. Dr. *Vladimir V. Voevodin* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Vladimir S. Zaborovsky*,

Prof. Dr. *Vladimir N. Kozlov*,

Prof. Dr. *Alexandr E. Fotiadi*,

Prof. Dr. *Igor G. Chernorutsky*.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

Prof. Dr. *Alexander S. Korotkov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Members:

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir M. Itsykson*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Prof. Dr. *Yevgeni Koucheryavy*, Tampere University of Technology, Finland.

Prof. Dr. *Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Prof. Dr. *Fa-Long Luo*, Affiliate Full Professor University of Washington, USA, Chief Scientist Micron Technology, Inc., Milpitas, USA, Chairman IEEE SPS Industry DSP Technology Standing Committee;

Prof. Dr. *Sergey B. Makarov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Prof. Dr. *Nikolay N. Prokopenko*, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;

Prof. Dr. *Mikhail G. Putrya*, National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia;

Sen. Assoc. Prof. Dr. *Evgeny Pyshkin*, School of Computer Science and Engineering, University of Aizu, Japan;

Prof. Dr. *Viacheslav P. Shkodyrev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Peter V. Trifonov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Igor A. Tsikin*, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Sergey M. Ustinov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Lev V. Utkin*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

The journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals and other editions to publish major findings of PhD theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences.

The journal is indexed by Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, EBSCO, ProQuest, Index Copernicus, VINITI RAS Abstract Journal (Referativnyi Zhurnal), VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Russian Science Citation Index (RSCI) database © Scientific Electronic Library and Math-Net.ru databases.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-51457 issued Oct. 19, 2012.

No part of this publication may be reproduced without clear reference to the source.

The views of the authors can contradict the views of the Editorial Board.

The address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.



Содержание

Информационные технологии

Селиверстов Я.А., Никитин К.В., Шаталова Н.В., Киселев А.А. Оценка состояния транспортных магистралей Северо-Западного федерального округа с использованием анализа тональности отзывов пользователей сети Интернет	7
--	---

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

Богатиков Е.В., Шебанов А.Н., Ангарита Лорес К.Э. Устройство обнаружения и цифровой обработки ультразвуковых сигналов	25
Нгуен Тан Хоанг Фьюк, Гельгор А.Л. Повышение спектральной эффективности DVB-S2 путём применения сигналов с управляемой интерференцией и финитными импульсами	37
Овсянникова А.С., Завьялов С.В., Волвенко С.В. Оценка эффективности совместного применения оптимальных FTN-сигналов и полярного кодирования	48

Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

Омётов А.Я., Жиданов К.А., Беззатеев С.В., Кучерявый Е.А. Перспективы использования технологии D2D в сотовых сетях	58
---	----

Информационные, управляющие и измерительные системы

Ковалевский В.Э., Онуфриев В.А. Мультиагентные алгоритмы согласования ключевых показателей эффективности предприятия	67
---	----

Contents

Information Technologies

- Seliverstov Ya.A., Nikitin K.V., Shatalova N.V., Kiselev A.A.** Road pavement assessment of the North-West Federal District using sentiment analysis of the Internet user reviews 7

Telecommunication Systems and Computer Networks

- Bogatikov E.V., Shebanov A.N., Angarita Lores C.E.** Ultrasound detection and digital processing device 25
- Nguyen Tan Hoang Phuoc, Gelgor A.L.** Improving spectral efficiency of DVB-S2 by using signals with controlled intersymbol interference and finite pulses 37
- Ovsyannikova A.S., Zavjalov S.V., Volvenko S.V.** The efficiency estimation of the joint application of optimal FTN signals and polar coding 48

Computer Simulations of Telecommunication, Control, and Social Systems

- Ometov A.Ya., Zhidanov K.A., Bezzateev S.V., Koucheryavy Y.A.** On the utilization of D2D technology in cellular networks 58

Information, Control and Measurement Systems

- Kovalevsky V.E., Onufriev V.A.** Multi-agent algorithms for enterprise's key performance indicators reconciliation 67

DOI: 10.18721/JCSTCS.12301

УДК 004.8, 004.62, 007.5, 51-74, 510.67, 656

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА ТОНАЛЬНОСТИ ОТЗЫВОВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СЕТИ ИНТЕРНЕТ

Я.А. Селиверстов¹, К.В. Никитин², Н.В. Шаталова¹, А.А. Киселев³

¹ Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

³ Санкт-Петербургская государственная художественно-промышленная
академия имени А.Л. Штиглица,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В результате анализа выявлено, что социальные сети, тематические сообщества, транспортные порталы являются источником актуальной информации о дорожно-транспортной обстановке. В статье рассмотрена задача анализа состояния транспортных магистралей Северо-Западного федерального округа по отзывам, размещенным в web-пространстве. Для решения этой задачи разработана система автоматической классификации отзывов на основе тонового классификатора. Проведен анализ библиотек с открытым исходным кодом для тематического сбора и анализа данных. Осуществлена разработка краулера с использованием фреймворка Scrapy на языке Python3 и собраны отзывы с сайта <http://autostrada.info/ru>. Рассмотрены методы векторизации и лемматизации текстов и их реализация в библиотеке Scikit-Learn: Bag-of-Words, N-gram, CountVectorizer и TF-IDF Vectorizer. Для классификации применялся наивный байесовский алгоритм и модель линейного классификатора с оптимизацией стохастического градиентного спуска. В качестве обучающей выборки использована база размеченных отзывов с ресурса Twitter. Проведено обучение классификатора, в ходе которого использована стратегия кросс-валидации и метод ShuffleSplit. Проведено тестирование и сравнение результатов тоновой классификации на разных классификаторах. По результатам валидации лучшей оказалась линейная модель со схемой N-gram и векторизатором TF-IDF. В ходе апробации разработанной системы проведен сбор и анализ отзывов, относящихся к качеству транспортных сетей Северо-Западного федерального округа. На основе результатов произведена цветовая разметка дорог, отражающая наглядность результатов исследования. Сделаны выводы и определены перспективы дальнейшего развития данного исследования.

Ключевые слова: автоматический анализ текстов, краулеры, классификация текстов, интеллектуальные транспортные системы, машинное обучение, TF-IDF, N-gram, наивный байесовский алгоритм, линейный классификатор, анализ тональности.

Ссылка при цитировании: Селиверстов Я.А., Никитин К.В., Шаталова Н.В., Киселев А.А. Оценка состояния транспортных магистралей Северо-Западного федерального округа с использованием анализа тональности отзывов пользователей сети Интернет // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 7–24. DOI: 10.18721/JCSTCS.12301

ROAD PAVEMENT ASSESSMENT OF THE NORTH-WEST FEDERAL DISTRICT USING SENTIMENT ANALYSIS OF THE INTERNET USER REVIEWS

Ya.A. Seliverstov¹, K.V. Nikitin², N.V. Shatalova¹, A.A. Kiselev³

¹ Solomenko Institute of Transport Problems of the RAS,
St. Petersburg, Russian Federation;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation;

³ Saint Petersburg Stieglitz State Academy of Art and Design,
St. Petersburg, Russian Federation

As a result of the analysis, it was revealed that social networks, thematic communities, transport portals are a source of actual information about the traffic situation. The article deals with the task of analyzing the road pavement assessment of the North-West Federal District from reviews posted in the web. To solve this problem, a system for automatic classification of reviews based on the sentiment classifier has been developed. The crawler was developed using the Scrapy framework in Python3 and collected reviews from the site <http://autostrada.info/ru>. The methods of vectorization and lemmatization of texts and their implementation in the Scikit-Learn library are considered: Bag-of-Words, N-gram, CountVectorizer and TF-IDF Vectorizer. For the classification, a naive Bayes algorithm and a linear classifier model with optimization of stochastic gradient descent were used. As a training sample, a base of marked reviews from the Twitter resource was used. The classifier was trained, during which the cross-validation strategy and the ShuffleSplit method were used. According to the results of validation, the linear model with the N-gram scheme and the TF-IDF Vectorizer turned out to be the best. During the approbation of the developed system, the collection and analysis of feedback related to the quality of transport networks in the North-West Federal District was conducted. Based on the results, a color marking of the roads was produced, reflecting the visibility of the research results. Conclusions and prospects for the further development of this study are given.

Keywords: automatic text analysis, crawlers, texts classification, intelligent transport systems, machine learning, TF-IDF, N-gram, naive Bayes algorithm, linear classifier, sentiment analysis.

Citation: Seliverstov Ya.A., Nikitin K.V., Shatalova N.V., Kiselev A.A. Road pavement assessment of the North-West Federal District using sentiment analysis of the Internet user reviews. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 3, Pp. 7–24. DOI: 10.18721/JCSTCS.12301

Введение

Традиционные методы, применяемые для обнаружения дорожных событий [1, 2], в основном сосредоточены на измерении скорости, плотности и интенсивности движения с использованием различных датчиков и детекторов, которые обычно устанавливаются в фиксированных местах вдоль дорог [3]. Такие системы, как правило, имеют высокую стоимость, и поэтому

их размещают лишь на особо загруженных участках городских магистралей. Также они требуют регулярного технического обслуживания и сопутствующей инфраструктуры.

Вместе с тем в последнее время актуальным источником разнородной информации, относящейся к сфере транспорта и логистики, является web-пространство [4]. Обычно такие данные находятся на тема-

тических или специализированных интернет-ресурсах, например: транспортные интернет-порталы (<http://autostrada.info/ru>, <https://gosyama.ru/>); интернет-сообщества грузоперевозчиков (<https://www.worldoftrucks.com/en/>, ingruz.ru); группы в социальных сетях (Вконтакте, Facebook) или в сетях микроблогинга (Twitter), а также чаты и форумы [5].

Информация на транспортных web-порталах и в тематических интернет-сообществах формируется в виде отзывов непосредственно самими пользователями, поэтому для ее сбора не требуется больших затрат. Тема web-портала или интернет-сообщества определяет характер размещаемой на ней информации. Например, если тематика группы – «пробки», то, как правило, размещаемые пользователями отзывы содержат сведения о пробках и заторах на дорогах; если же тематика группы – «поборы на дорогах», то размещаемые пользователями отзывы содержат сведения о недобросовестной работе сотрудников весового контроля или ГИБДД [6].

Такое структурирование информации упрощает процесс составления тематических корпусов в области транспорта, что в свою очередь позволяет строить более глубокие системы классификации транспортных данных и выявлять на их основе новые управляющие воздействия [7].

Таким образом, использование систем извлечения и анализа дорожно-транспортной информации из web-пространства в качестве систем транспортного мониторинга [8, 9] открывает новые каналы поступления транспортной информации, способной повысить информированность участников дорожного движения о состоянии транспортных сетей и условий дорожного движения.

Анализ предметной области. Проанализируем актуальные работы, в которых рассмотрены методы анализа текстов, относящихся к транспортной сфере. В [10] изучено использование данных социальных сетей для обеспечения быстрого и более точного обнаружения и уменьшения

пробок на дорогах. В [11] авторы исследовали возможность использования данных форумов с интернет-порталов для обнаружения дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и сбора дополнительной информации об инцидентах. В [12] представлен обзор различных категорий социальных сетей, характеристик их контента и того, как эти характеристики отражаются в сообщениях, связанных с транспортом. В работе [13] проведено исследование полезности использования социальных сетей для пользователей и поставщиков транспортных услуг и потенциальной ценности социальных сетей для разработки политики в области распространения информации для населения. В [14] описана система анализа данных социальных сетей микроблогинга Twitter, которая используется для выявления транспортных заторов в реальном времени для дорог Австралии.

Анализ предметной области показал, что передовые системы для извлечения и анализа тематических текстов активно внедряются в системы городского транспортного мониторинга и системы поддержки туристической и транспортной мобильности.

Постановка задачи. Цель настоящего исследования – оценка состояния транспортных магистралей Северо-Западного федерального округа с использованием анализа тональности отзывов пользователей сети Интернет.

Предполагается выполнить следующий перечень работ: 1) определить тематические web-ресурсы, предоставляющие актуальную информацию о дорогах Северо-Западного федерального округа; 2) разработать схему алгоритма для извлечения и анализа текстов; 3) программно реализовать алгоритм для сбора текстов по дорожно-транспортной проблематике; 4) произвести тестирование разработанной программы и осуществить сбор текстов с выбранного интернет-ресурса; 5) сформировать корпуса текстов для последующего обучения классификатора; 6) осуществить разработ-

ку классификатора тональности; 7) провести обучение классификатора и оценить качество классификации; 8) произвести оценку состояния транспортных магистралей Северо-Западного федерального округа с использованием разработанной системы анализа текстов.

Этапы работы

Этап 1. Выполнение анализа интернет-ресурсов, содержащих актуальную информацию пользователей о состоянии дорог Северо-Западного федерального округа. Результаты анализа транспортных интернет-ресурсов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Транспортные интернет-ресурсы

Table 1

Transport Internet Resources

Наименование	Примечание
Тематический транспортный web-ресурс «Порталы»	
«Автострада» – проект об актуальном состоянии дорожного покрытия трасс России, Украины и Беларуси	http://autostrada.info/ru
«Доринфо» – дорожные новости, репортажи, аналитика, отзывы	http://dorinfo.ru/
«Центр организации дорожного движения Правительства Москвы» – сбор данных о дорожном движении, включая параметры транспортных и пассажирских потоков, дорожных условий, действующей организации дорожного движения, параметры экологического ущерба от дорожного движения, статистику ДТП, данные по парковкам и местам временного отстоя транспорта	http://www.gucodd.ru/
«РосЯма» – проект об актуальном состоянии дорожного покрытия улично-дорожных сетей городов России	https://rosyama.ru/
«Дорожная инспекция ОНФ/Карта убитых дорог» – проект о состоянии УДС городов России	http://dorogi-onf.ru/
Портал «РосАвтодора» раздел «Автомобилистам» посвящен ситуации на дорогах	http://rosavtodor.ru/avtomobilistam
Форум «АвтоТрансИнфо» – информация и отзывы водителей грузового транспорта	https://forums.ati.su/Forum/Default.aspx
Тематический транспортный web-ресурс Твиттер	
«Dorinfo» – актуальные дорожные новости и твиты пользователей	https://twitter.com/dorinfo
«Московский транспорт» – оперативная информация о дорожной ситуации на улицах Москвы, сбоях и изменениях в работе городского транспорта, перекрытиях дорог	https://twitter.com/DtRoad
«Московское метро» – официальный твиттер-аккаунт Московского метрополитена по оперативному информированию о работе метро	https://twitter.com/nwroads
Тематический транспортный web-ресурс – группы в ВК	
«СколькоДал.РФ» – поборы и взятки на дорогах РФ: отзывы водителей, интересные сюжеты, горячие новости и скандальные расследования	https://vk.com/skolko_dal
«Автостоп Community» – путешествия автостопом и все вопросы, связанные с ним	https://vk.com/ru_autostop
«Автостоп Онлайн» – новое, бесплатное приложение для поиска водителей и пассажиров, без диспетчеров	https://vk.com/autostop.online

Таблица 2

Анализ web-краулеров

Table 2

Analysis of web crawlers

Название	Техническое описание	Примечание
Heritrix	Гибкий, расширяемый, надежный и масштабируемый фреймворк, написанный на Java, способный получать, архивировать и анализировать тексты. Heritrix работает в распределенной среде с помощью хеширования URL хостов в поисковых машинах	[17, 18]
Nutch	Представляет собой инкрементный, параллельный, распределенный, кросс-платформенный модульный фреймворк для построения поисковых систем, написанный на java. Поддерживает граф связей узлов, различные фильтры и нормализацию URL	
Scrapy	Расширяемый, сфокусированный, параллельный, кросс-платформенный и гибкий фреймворк-библиотека для Python. Легко устанавливается, поддерживает выгрузку данных в форматах JSON, XML, CSV. Широко используется для веб-скрайпинга, не имеет встроенных функций для работы в распределенной среде	

В качестве интернет-ресурса для дальнейшего исследования выберем портал <http://autostrada.info/ru>, так как на нем содержатся актуальные и постоянно обновляемые отзывы о состоянии дорог Северо-Западного федерального округа.

Этап 2. Выполнение анализа фреймворков, предназначенных для парсинга¹ и краулинга². На сегодняшний момент уже существует широкий спектр известных библиотек [15, 16], которые позволяют не писать с нуля поисковые роботы. На основе анализа технических описаний фреймворков для сбора текстов, представленного в табл. 2, целесообразно выбрать фреймворк Scrapy.

Scrapy используется для получения данных с различных интернет-ресурсов, является популярным и производительным фреймворком, написанным на Python.

Этап 3. Разработка алгоритма работы системы для извлечения и анализа текстов. Алгоритм состоит из процедур, представ-

ленных в табл. 3, а схема алгоритма представлена на рис. 1.

Этап 4. Построение краулер-модуля. Краулер-модуль выполняет процедуры 1–4 алгоритма: 1) формирует очередь ссылок; 2) добавляет список источников в очередь обхода; 3) сканирует страницу из очереди; 4) скачивает интересующий его веб-документ в базу данных.

В результате работы краулер-модуль формирует базу данных с отзывами пользователей.

Все собранные краулером отзывы группируются в единый текст и подвергаются процедуре предобработки: слова приводятся к нижнему регистру, затем отсеиваются все вспомогательные символы, такие как знаки препинания и стоп-слова. Далее с помощью библиотеки `ruemoji2` слова приводятся к нормальной форме.

Этап 5. Векторизация [19] и лексический анализ отзывов. Все слова необходимо перевести в числовой вектор признаков с помощью одного из методов TF, IDF и TF-IDF [20]. Для этой процедуры используются векторизаторы. Векторизатор строит словарь индексов признаков. Мы будем использовать два векторизатора: `CountVectorizer` и `TF-IDF Vectorizer` [21]. Оба метода используют модель `Bag of Words` [22] и модель `N-gram` [23].

¹ Парсинг (parsing – разбор) – автоматизированный сбор неструктурированной информации, ее преобразование и выдача в структурированном виде.

² Краулинг (crawling – сканирование) – процесс сбора данных в Интернет, состоящий из навигации на веб-страницах, анализа их ссылок и содержимого.

Таблица 3

Общий вид алгоритма для извлечения и анализа тематических текстов

Table 3

General view of the algorithm for extracting and analyzing thematic texts

Наименование процедуры
1. Формирование очереди ссылок, подаваемых на вход краулера
2. Список источников добавляются в очередь обхода краулера
3. Краулер сканирует страницу из очереди
4. Краулер скачивает интересующий его web-документ в базу данных
5. Проводится очистка web-документа от «мусора»
6. Производится сохранение очищенного текста в базу данных
7. Подготовка коллекций, ручная разметка текстов и построение корпуса тематических текстов
8. Запуск классификатора тональности
9. Обучение классификатора на различных корпусах текстов
10. Оценка работы классификатора тональности

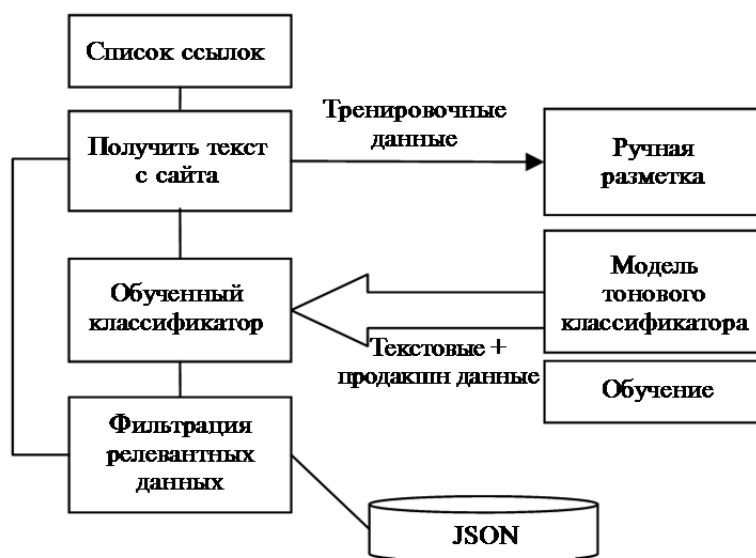


Рис. 1. Схема алгоритма работы системы для извлечения и анализа тематических текстов

Fig. 1. Diagram of the algorithm of the system for extracting and analyzing thematic texts

Этап 6. Разработка классификатора тональности. Для построения модели тонового классификатора рассмотрим две наиболее используемые модели классификации: наивный байесовский классификатор и линейный классификатор на основе стохастического градиента.

Существуют два подхода к наивному байесовскому классификатору: мультиномиальный и многомерный, которые дают разные результаты [24].

Недостатком многомерного байесовского классификатора является то, что он не учитывает количество вхождений слова в документ.

Эта проблема решена в мультиномиальной модели байесовского классификатора, где документ представляет собой последовательность слов.

Многомерная модель дает лучшую оценку предсказания на текстах с небольшим объемом слов. Мультиномиальная

модель — в случае, когда размер текстов составляет несколько тысяч слов [24].

Таким образом, в ходе разработки классификатора целесообразнее использовать мультиномиальную модель байесовского классификатора.

Основная идея линейного классификатора заключается в том, что признаковое пространство может быть разделено гиперплоскостью на две полуплоскости, в каждой из которых прогнозируется одно из двух значений целевого класса.

В ряде случаев задачи текстовой классификации, включающие в себя более одного класса, сводятся к нескольким задачам бинарной классификации [25, 26].

Метод стохастического градиента хорошо приспособлен для динамического обучения, когда обучающие объекты поступают потоком, и надо быстро обновлять вектор весов при появлении каждого нового объекта.

В программном исполнении наивный байесовский классификатор реализован в

библиотеке Scikit-Learn в виде стандартного метода MultinomialNB, а линейный классификатор на основе стохастического градиента — в виде SGDClassifier.

В связи с тем, что объем текстов на транспортном интернет-портале <http://autostrada.info/ru> составляет десятки тысяч слов, для разработки модели классификатора тональности целесообразно использовать мультиномиальную модель байесовского классификатора (MultinomialNB) и линейную модель классификатора на основе стохастического градиента (SGDClassifier).

Рассмотренные этапы (1–6) в общем виде представляют собой методику построения системы анализа отзывов на основе классификатора тональности.

Программная реализация

Краулер-модуль будем разрабатывать на основе выбранного фреймворка Scrapy. В качестве языка программирования выберем Python 3. Часть программы краулер-модуля представлена в листинге 1.

```

import scrapy
class RoadSpider(scrapy.Spider):
    name = 'road_spider'
    start_urls = [
        'http://autostrada.info/ru/reviews/page/1/',
    ]
    def parse(self, response):
        for review in response.css('div.col-md-12.reviewBlock'):
            tmp = review.css('p.comment.break-word::text').extract_first()
            tmp1 = review.css('a.label.label-code::text').extract_first()
            tmp2 = review.css('a.highwayLabel::text').extract_first()
            tmp = tmp.replace("\r\n", '')
            tmp = tmp.replace("\n", "")
            dd = {
                'title': tmp1 + ' ' + tmp2,
                'subtitle': review.css('div.col-sm-8.b-rate.hidden-xs
                    b::text').extract_first(),
                'date': review.css('strong.reviewDate::text').extract_first(),
                'rate': review.css('span.b-stars::attr(title)').extract_first(),
                'description': tmp,
            }
            try:
                dd['date'] = dd['date'].replace('\t', '')
                dd['date'] = dd['date'].replace('\n', '')
                dd['date'] = dd['date'].replace('\u0433.', '')
            except:
                pass
            yield dd
    
```

Листинг 1. Часть программы краулер-модуля
Listing 1. Part of the crawler module program

В процессе работы краулера с сайта <http://autostrada.info/ru> извлекаются мнения пользователей в текстовом виде.

В результате работы краулер-модуля был собран корпус, содержащий 1130 текстов за период с 01 марта 2009 по 1 ноября 2018 года с сайта <http://autostrada.info/ru>. Рассмотрим несколько примеров текстов корпуса и того, что в них содержится.

На рис. 2 представлен пример структуры отзыва с сайта <http://autostrada.info/ru> о состоянии участка трассы, пролегающего между Лугой и Невелем.

Извлеченный текст записывается в базу данных с указанием атрибутов: date (дата создания отзыва), description (описание ситуации), subtitle (наименование трассы), title (кодифицированное наз-

вание трассы) и url (адрес отзыва в Интернет).

Например, для отзыва, представленного на рис. 3, атрибуты имеют вид: date: «05.02.2018 15:21»; description: «Участок дороги от Пскова до Луги...»; Subtitle: «Луга – Невель»; title: «Санкт-Петербург – Псков – Невель».

Таким образом, результатом работы краулер-модуля является база данных «dd» с отзывами пользователей.

На следующем этапе осуществляется векторизация и лексический анализ текста.

Для векторизации и лексического анализа текста будем использовать два метода из библиотеки sklearn: CountVectorizer и TF-IDF Vectorizer с мерой TF-IDF. Данные методы используют модели Bag of Words и модель N-gram.

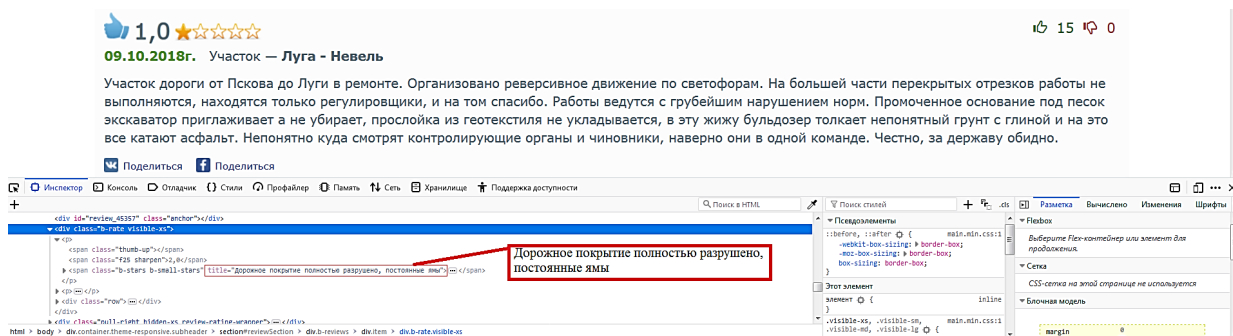


Рис. 2. Структура отзыва на сайте <http://autostrada.info/ru>

Fig. 2. Review structure on the site <http://autostrada.info/ru>

```
{'date': '09.10.2018',
 'description': 'Участок дороги от Пскова до Луги в ремонте. Организовано '
               'реверсивное движение по светофорам. На большей части '
               'перекрытых отрезков работы не выполняются, находятся только '
               'регулирующие, и на том спасибо. Работы ведутся с грубейшим '
               'нарушением норм. Промоченное основание под песок экскаватор '
               'приглаживает а не убирает, прослойка из геотекстиля не '
               'укладывается, в эту жижу бульдозер толкает непонятный грунт '
               'с глиной и на это все катают асфальт. Непонятно куда смотрят '
               'контролирующие органы и чиновники, наверно они в одной '
               'команде. Честно, за державу обидно',
 'subtitle': 'Луга - Невель',
 'title': 'Санкт-Петербург - Псков - Невель',
 'rate': 'Дорога со значительными разрушениями дорожного полотна',
 'url': 'https://autostrada.info/ru/highway/M-20'}
```

Рис. 3. Структура отзыва в базе данных

Fig. 3. Recall structure in the database

```
# Наивный байес
clf = MultinomialNB()
NB_result = cross_val_score(clf, X, y, cv=cv).mean()
# Линейный классификатор
clf = SGDClassifier()
parameters = {
    'loss': ('log', 'hinge'),
    'penalty': ['none', 'l1', 'l2', 'elasticnet'],
    'alpha': [0.001, 0.0001, 0.00001, 0.000001]
}
gs_clf = GridSearchCV(clf, parameters, cv=cv, n_jobs=-1)
gs_clf = gs_clf.fit(X, y)
L_result = gs_clf.best_score_
```

Листинг 2. Программа тонового классификатора
Listing 2. Listing the tone classifier program

Программную разработку тонового классификатора будем вести на языке Python 3, используя рассмотренные выше модели классификации.

Программа тонового классификатора на основе стандартных методов MultinomialNB и SGDClassifier классификаторов представлена в листинге 2.

Обучение разработанного классификатора будем проводить с использованием готовой выборки³, состоящей приблизительно из 225 тысяч размеченных твитов, имеющих положительные и отрицательные окрасы.

В ходе тестирования качество классификации было максимизировано путем перебора выбранных различных сочетаний классификатора, метода векторизации, схемы N-gram и других параметров. В ходе тестирования были рассмотрены: вид функции потерь, вид регуляризации и множитель альфа перед регуляризацией. В качестве стратегии кросс-валидации применялся метод ShuffleSplit из библиотеки Scikit-Learn, производилось пять итераций и в тестовую выборку отсекалось 30 % данных. Результаты последних пяти итераций представлены на рис. 4. По результатам валидации лучшей оказалась линейная модель со схемой N-gram: (1, 3)

³ <http://study.mokoron.com/>

(униграммы + биграммы + триграммы), векторизатором TF-IDF и параметрами: penalty – l2⁴, alpha – 0.000001⁵, loss – log⁶. Ее результат ≈ 0.72 .

Качество классификации превышает 70 %, что говорит о правильном подборе релевантных обучающих выборок.

Результаты

В результате работы тестовой эксплуатации системы для извлечения и анализа дорожно-транспортной информации с сайта <http://autostrada.info/ru> удалось получить информацию о проблемных участках улично-дорожной сети и неблагоприятных дорожных ситуациях на дорогах Северо-Западного региона России.

Проанализировав классификацию отзывов, получили две выборки: положительные отзывы и отрицательные. Результаты анализа сведены в табл. 4.

Примеры положительных и отрицательных отзывов, полученных при классификации, представлены в табл. 5.

⁴ Функция штрафа L2-регуляризация, которая штрафует весовые значения добавлением суммы их квадратов к ошибке.

⁵ Константа, которая умножает член регуляризации.

⁶ Функция потерь в виде логистической регрессии.

```
N-gram Scheme: (1, 1)
Count Vectorizer
NB: 0.636833277424
Linear: 0.667829587387
Linear Parameters: {'alpha': 0.0001, 'penalty': 'elasticnet', 'loss': 'log'}

TF-IDF Vectorizer
NB: 0.583092921838
Linear: 0.690909090909
Linear Parameters: {'alpha': 1e-05, 'penalty': 'elasticnet', 'loss': 'log'}

N-gram Scheme: (1, 2)
Count Vectorizer
NB: 0.681784636028
Linear: 0.705333780611
Linear Parameters: {'alpha': 0.001, 'penalty': 'l2', 'loss': 'hinge'}

TF-IDF Vectorizer
NB: 0.608587722241
Linear: 0.717343173432
Linear Parameters: {'alpha': 1e-05, 'penalty': 'elasticnet', 'loss': 'log'}

N-gram Scheme: (1, 3)
Count Vectorizer
NB: 0.692787655149
Linear: 0.714793693391
Linear Parameters: {'alpha': 0.001, 'penalty': 'l2', 'loss': 'log'}

TF-IDF Vectorizer
NB: 0.633143240523
Linear: 0.719490103992
Linear Parameters: {'alpha': 0.0001, 'penalty': 'l2', 'loss': 'hinge'}

N-gram Scheme: (1, 4)
Count Vectorizer
NB: 0.69533713519
Linear: 0.719154646092
Linear Parameters: {'alpha': 0.001, 'penalty': 'l2', 'loss': 'hinge'}

TF-IDF Vectorizer
NB: 0.650788326065
Linear: 0.719490103992
Linear Parameters: {'alpha': 0.0001, 'penalty': 'l2', 'loss': 'hinge'}

N-gram Scheme: (1, 5)
Count Vectorizer
NB: 0.690640724589
Linear: 0.715062059712
Linear Parameters: {'alpha': 0.001, 'penalty': 'l2', 'loss': 'hinge'}

TF-IDF Vectorizer
NB: 0.660986246226
Linear: 0.718483730292
Linear Parameters: {'alpha': 0.0001, 'penalty': 'l2', 'loss': 'hinge'}
```

Рис. 4. Оценка работы тонового классификатора
Fig. 4. Evaluation of the tone classifier

Результаты автоматической классификации трасс по отзывам
Results of automatic classification of tracks according to reviews

Таблица 4

Table 4

Номер трассы	Наименование трассы	Участок трассы	Протяженность участка, км	Тип отзыва
Отрицательные отзывы			3385	отрицательный
М-20	Санкт-Петербург – Псков – Невель	Луга – Невель	384,0	отрицательный
Р-41	Павлово – Луга	–	190,0	отрицательный
Р-52	Шимск – Феофилова Пустынь	–	79,0	отрицательный
М-10	Новая Ладога	М-10 – Кириши	44,0	отрицательный
А-121	Санкт-Петербург – Сортавала	Санкт-Петербург – Приозерск	154,0	отрицательный
Р-8	Устюжна – Валдай	Боровичи – Лыкошино	267,0	отрицательный
Р-85	Вышний Волочек – Сонково	Вышний Волочек – Максатиха	96,0	отрицательный
М-11	Москва – Санкт-Петербург	обход Вышнего Волочка	76,0	отрицательный
Р-104	Сергиев Посад – Череповец	Рыбинск – Череповец	180,0	отрицательный
Р-37	Лодейное Поле – Вытегра	–	189,0	отрицательный
Р-19	Петрозаводск – Ошта	–	168,0	отрицательный
Р-20	Спасская Губа – А-132	–	197,0	отрицательный
А-132	Суоярви – Юостозеро	–	140,0	отрицательный
Р-18	Беломорск – М-18 "Кола"	–	36,0	отрицательный
А-135	Кемь – Лонка	Калевала – Финляндия	89,0	отрицательный
А-137	Тунгозеро – Калевала	–	70,0	отрицательный
А-136	Лоухи – Суоперя	–	170,0	отрицательный
Р-100	Судиславль – Солигалич	–	167,0	отрицательный
Р-100	Судиславль – Солигалич	Судиславль – Галич	76,0	отрицательный
Р-7	Чекшино – Никольск	Тотьма – Никольск	210,0	отрицательный
Р-157	Урень – Котлас	Никольск – Великий Устюг	170,0	отрицательный
Р-87	Ржев – Осташков	–	125,0	отрицательный
А-112	Тверь – Ржев	–	108,0	отрицательный
Положительные отзывы			9874	положительный
А-130	Олонец – Вяртсиля	–	249,0	положительный
А-121	Санкт-Петербург – Сортавала	Приозерск – Сортавала	132,0	положительный
Р-21	Пряжа – Леметти	–	177,0	положительный
А-133	Петрозаводск – Суоярви	–	134,0	положительный
Р-15	Шуйская – Гирвас	–	78,0	положительный
Р-21	Санкт-Петербург – Мурманск	Санкт-Петербург – Медвежьегорск	566,0	положительный

Окончание табл. 4

Номер трассы	Наименование трассы	Участок трассы	Протяженность участка, км	Тип отзыва
P-17	Медвежьегорск – Великая Губа	–	120,0	положительный
P-5	Вологда – Медвежьегорск	–	636,0	положительный
P-2	Долматово – Каргополь	–	223,0	положительный
P-1	Брин-Наволоок – Прокшино	–	517,0	положительный
M-8	Москва – Ярославль – Архангельск	Вологда – Архангельск	770,0	положительный
P-176	Чебоксары – Йошкар-Ола – Сыктывкар	–	872,0	положительный
P-56	Великий Новгород – Псков	–	251,0	положительный
M-9	Москва – Волоколамск – Латвия	Москва – Великие Луки	470,0	положительный
M-20	Санкт-Петербург – Псков – Невель	–	500,0	положительный
M-10	Москва – Санкт-Петербург	Москва – Валдай	390,0	положительный
A-111	Торжок – Осташков	–	126,0	положительный
P-84	Тверь – Устюжна	–	283,0	положительный
A-181	Санкт-Петербург – Выборг – Торфяновка	–	147,0	положительный
A-180	Санкт-Петербург – Нарва	–	160,0	положительный
A-127	Зверево – Малиновка	–	85	положительный
A-123	Зеленогорск – Выборг	–	92,0	положительный
A-125	Молодежное – Черкасово	–	70	положительный
A-120	Молодежное – Большая Ижора	Черемыкино – Кировск	123,0	положительный
A-118	КАД	–	142	положительный
M-18	Санкт-Петербург – Мурманск	Санкт-Петербург – Медвежьегорск	566	положительный
A-114	Вологда – Новая Ладога	Тихвин – Новая Ладога	100	положительный
P-7	Чекшино – Никольск	Чекшино – Тотьма	150	положительный
P-157	Урень – Котлас	Урень – Никольск	263	положительный
P104	Сергиев Посад – Череповец	Калязин – Рыбинск	128	положительный
P-25	Сыктывкар – Ухта	–	321	положительный
P-243	Кострома – Киров – Пермь	Киров – Пермь	490	положительный
P-168	Киров – Адышево – Верхошижемье – Советск	–	137	положительный
P-176	Чебоксары – Йошкар-Ола – Сыктывкар	Яранск – Киров	250,0	положительный
P-600	Ярославль – Кострома – Иваново	Кострома – Иваново	103	положительный
P-101	Островское – Заволжск – Кинешма	–	53	положительный

Таблица 5

Примеры классификации отзывов на трассы Северо-Западного региона

Table 5

Examples of classification of reviews on the tracks of the North-West region

Номер трассы	Трасса	Положительные	Отрицательные
М-10	Москва – Санкт-Петербург (Великий Новгород – Чудово)	Санкт-Петербург – Новгород замечательная дорога	Ужас!!! Ехали 25.08.2018 со стороны Демянска. Нет слов просто, пробки и все из за светофоров, а самое главное из-за ремонта моста. Хотя бы объездную бы придумали самый нужный участок дороги и вот такая Ж...((((Я не против ремонта это хорошо но варианты объезда тоже нужно было продумывать. С ребёнком 2,5 часа в пробке .(((
М-18	Санкт-Петербург – Мурманск (Санкт-Петербург – Медвежьегорск)	Все хорошо, ехать можно	'До Петрозаводска-ОК! В Карелии много камер
А-114	Вологда – Новая Ладога	'Участок от поворота на Устюжну до Новой Ладоги. Почти везде отличное покрытие, местами прямо немецкий автобан! Трафик небольшой. Про камеры в Вологодской области уже говорили, но там, где их нет, абсолютно спокойно едет 120 и выше! Начиная от Пикалёво (аккуратно едем по объездной, есть один незаметный очень поганый кусок) трафик постепенно начинает расти	Дорога хорошая, но такого количества камер вы не встретите нигде. По-моему это называется – беспредел со стороны ГИБДД. Получила штраф, что называется, на ровном месте. Едешь на разрешенной по трассе скорости, вдруг знак – резкое снижение скорости до 40 км. При этом никакого населенного пункта. Через триста метров, ограничение снимается и ты можешь опять ехать 90-100. Как это называть иначе, как ловушка для того, чтобы стричь штрафы? И таких выдумок на трассе достаточно

В Северо-Западном федеральном округе протяженность положительно оцененных дорог по отзывам пользователей портала Autostrada.info/ru составила 9874 км или 75 %, а отрицательно оцененных дорог – 3385 км или 25 %.

Диаграмма оценки состояния дорог Северо-Западного федерального округа по

отзывам пользователей Autostrada.info/ru, с учетом протяженности, представлена на рис. 5.

Для наглядности результатов исследования приведем размеченную карту дорог Северо-Западного федерального округа, соответствующую положительным и отрицательным отзывам (см. рис. 6).



Рис. 5. Оценка дорог Северо-Западного федерального округа по отзывам пользователей Autostrada.info/ru

Fig. 5. Road rating of the North-West Federal District according to user reviews Autostrada.info/ru

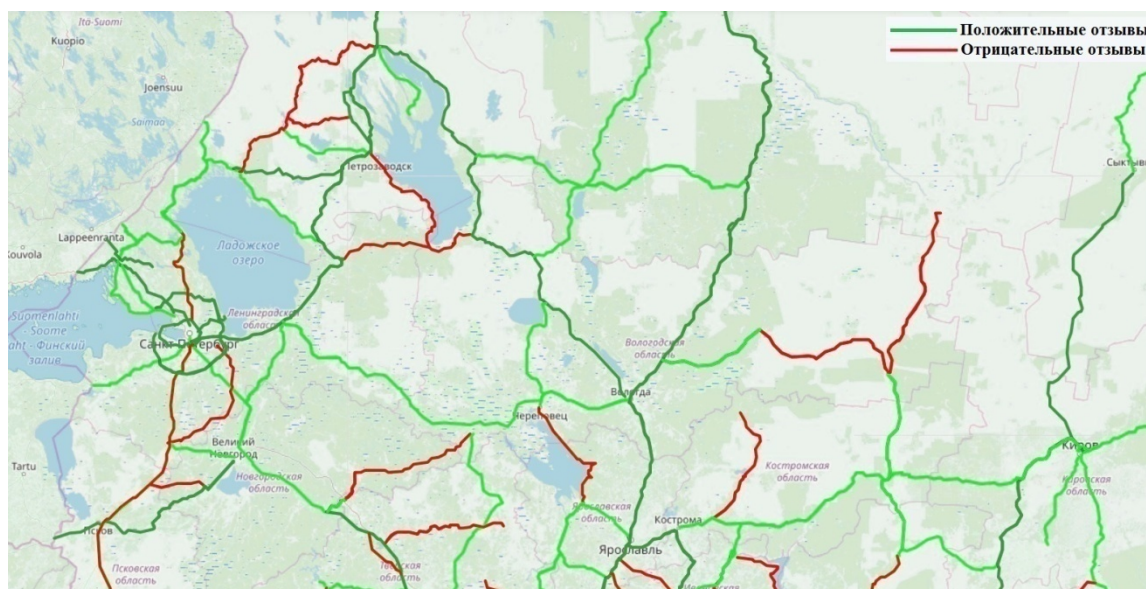


Рис. 6. Размеченная в соответствии с отзывами карта дорог Северо-Западного федерального округа

Fig. 6. Road map of the North-West Federal District marked according to reviews

Выводы

Разработана система для извлечения и тонового анализа отзывов с портала Autostrada.info/ru о дорогах Северо-Западного федерального округа. В результате классификации отзывы были разбиты на две выборки – положительные и отрицательные. Точность классификации составила 71,94 %. В соответствии с отзывами была произведена цветовая разметка карты дорог Северо-Западного федерального округа. Размеченная карта позволила визуально отобразить проблемные участки улично-дорожной сети, а база с отрицательными отзывами – содержательно охарактеризовать указанные в отзыве проблемы.

Данная информация может использоваться дорожными службами в качестве первичной информации для выявления проблемных участков улично-дорожной сети транспортных магистралей, на которых отсутствуют дорожные видеокамеры.

В дальнейшем планируется реализовать глубокую классификацию отзывов по тематическим группам, таким как пробки, ДТП, ремонт, гололед, снежные заторы, штрафы и др. В рамках следующего этапа планируется сравнить методы BAG-of-Words и TF-IDF с методом векторного представления слов Word2Vec, который показал лучшие результаты [27]. Также планируется рассмотреть новые методы тематической классификации

текстов, такие как сверточные нейронные сети, метод опорных векторов и др.

Подобные технологии позволят расширить существующие системы транспортного мониторинга в части учета новых показателей [28, 29] и дадут толчок к развитию новых систем управления дорожным дви-

жением [30] и транспортной мобильностью населения [31, 32].

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки РФ НИОКТР «Разработка теоретических основ организации сложных когнитивных транспортных систем» № АААА-А19-119032590097-6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coifman B., Dhoorjaty S. Event data-based traffic detector validation tests // *J. of Transportation Engineering*. 2004. Vol. 130(3). Pp. 313–321 // URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:3\(313\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(313))
2. Maghrour Z.M., Torok A. Single loop detector data validation and imputation of missing data. *Measurement* // URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.066> (Дата обращения: 01.11.2017)
3. Laña I., Olabarrieta I. (Iñaki), Vélez M., Del Ser J. On the imputation of missing data for road traffic forecasting: New insights and novel techniques // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018. Vol. 90. Pp. 18–33 // URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.021>
4. Semwal D., Patil S., Galhotra S., Arora A., Unny N. (2015). STAR: Real-time spatiotemporal analysis and prediction of traffic insights using social media // *Proc. of the 2nd IKDD Conf. on Data Sciences*. Bangalore, India: ACM, 2015. P. 7 // URL: <http://dx.doi.org/10.1145/2778865.2778872>
5. Gutiérrez C., Figuerias P., Oliveira P., Costa R., Jardim-Goncalves R. Twitter mining for traffic events detection. 2015 *Science and Information Conf*. London, UK: IEEE, 2015. Pp. 371–378 // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/SAL.2015.7237170>.
6. Селиверстов Я.А., Чигур В.И., Сазанов А.М., Селиверстов С.А., Свистунова А.С. Разработка системы для тонового анализа отзывов пользователей портала «autostrada.info/ru» // *Труды СПИИРАН*. 2019. Т. 18. № 2. С. 354–389 // URL: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.18.2.354-389>
7. Rashidi T.H., Abbasi A., Maghrebi M., Hasan S., Waller T.S. Exploring the capacity of social media data for modelling travel behaviour: Opportunities and challenges // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017. Vol. 75. Pp. 197–211 // URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.008>
8. Seliverstov Ya.A., Seliverstov Sv.A., Komashinskiy V.I., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Grigoriev V.A. Intelligent systems preventing road traffic accidents in megalopolises in order to evaluate // *Proc. of 2017 20th IEEE Internat. Conf. on Soft Computing and Measurements*. 2017. Pp. 489–92 // URL: <https://doi.org/10.1109/CTSUS.2017.8109528>
9. Seliverstov Y.A., Seliverstov S.A., Malygin I.G., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Lukomskaya O.Y., Tishchenko I.P., Elyashevich A.M. Development of management principles of urban traffic under conditions of information uncertainty // *Communications in Computer and Information Science*. 2017. Vol. 754. Pp. 399–41 // URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-65551-2_29
10. Djahel S., Doolan R., Muntean G.-M., Murphy J. A communications-oriented perspective on traffic management systems for smart cities: Challenges and innovative approaches // *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 2015. Vol. 17(1). Pp. 125–151 // URL: <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2014.2339817>
11. Fu K., Nune R., Tao J.X. Social media data analysis for traffic incident detection and management // *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*. 2015. No. 15-4022 // URL: <https://trid.trb.org/view/1338383>
12. Gal-Tzur A., Grant-Muller S.M., Kuflik T., Minkov E., Nocera S., Shoor I. The potential of social media in delivering transport policy goals // *Transport Policy*. 2014. No. 32. Pp. 115–123 // URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.01.007>
13. Gal-Tzur A., Grant-Muller S.M., Minkov E., Nocera S. The impact of social media usage on transport policy: Issues, challenges and recommendations // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 111. Pp. 937–946 // URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.128>
14. Gong Y., Deng F., Sinnott R.O. Identification of (near) real-time traffic congestion in the cities of Australia through Twitter // *Proc. of the ACM 1st Internat. Workshop on Understanding the City with Urban Informatics*. Melbourne, Australia: ACM. 2015. Pp. 7–12 // URL: <http://dx.doi.org/10.1145/2811271.2811276>
15. Zhenhua Zhang, Ming Ni, Qing He, Jing Gao. Final report. Mining transportation information from social media for planned and unplanned events. University at Buffalo, SUNY & Transportation Informatics Tier I University Transportation Center, 2016. 68 p.
16. Zhang Z., He Q., Gao J., Ni M. A deep learning approach for detecting traffic accidents

from social media data // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018. Vol. 86. Pp. 580–596. DOI:10.1016/j.trc.2017.11.027

17. Шелманов А.О., Каменская М.А., Ананьева М.И., Смирнов И.В. Семантико-синтаксический анализ текстов в задачах вопросно-ответного поиска и извлечения определений // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2016. № 4. С. 47–61.

18. Кузнецов А.Н., Вышемирский Д.А. Об одном подходе к решению задачи токенизации при анализе больших массивов пользовательских паролей // *Безопасность информационных технологий*. 2017. № 2. С. 50–60.

19. Chen K., Zhang Z., Long J., Zhang H. Turning from TF-IDF to TF-IGM for term weighting in text classification // *Expert Systems with Applications*, 2016. Vol. 66. Pp. 245–260. DOI: 10.1016/j.eswa.2016.09.009

20. Bissan Ghaddar, Joe Naoum-Sawaya. High dimensional data classification and feature selection using support vector machines // *European J. of Operational Research*. 2018. Vol. 265. Iss. 3. Pp. 993–1004.

21. Jimenez-Marquez J. L., Gonzalez-Carrasco I., Lopez-Cuadrado J.L., Ruiz-Mezcua B. Towards a big data framework for analyzing social media content // *Internat. J. of Informing Management*. 2019. Vol. 44. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2018.09.003

22. Bissan Ghaddar, Joe Naoum-Sawaya. High dimensional data classification and feature selection using support vector machines // *European J. of Operational Research*. 2018. Vol. 265. Iss. 3. Pp. 993–1004.

23. Dey A., Jenamani M., Thakkar J.J. Senti-N-Gram: An N-gram lexicon for sentiment analysis // *Expert Systems with Applications*. 2018. Vol. 103. Pp. 92–105. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.03.004

24. Сизов А.А., Николенко С.И. Наивный байесовский классификатор. DOCPLAYER //

URL: <https://docplayer.ru/45424867-Naivnyy-bayesovskiy-klassifikator.html> (Дата обращения: 25.01.2019).

25. Воронцов К.В. Вероятностное тематическое моделирование // URL: <http://www.machinlearning.ru/wiki/images/2/22/Voron-2013-ptm.pdf>

26. Воронцов К.В. Лекции по линейным алгоритмам классификации // URL: <http://www.machinlearning.ru/wiki/images/6/68/voron-ML-Lin.pdf>

27. Kim D., Seo D., Cho S., Kang P. Multi-co-training for document classification using various document representations: TF-IDF, LDA, and Doc2Vec // *Information Sciences*. 2019. Vol. 477. Pp. 15–29.

28. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Обзор показателей транспортной обеспеченности мегаполиса // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 5 (52). С. 237–247.

29. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О методе оценки эффективности организации процесса дорожного движения мегаполиса // *Вестник транспорта Поволжья*. 2015. № 2 (50). С. 91–96.

30. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Метод построения пути субъективного предпочтительного следования // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2016. Т. 4. С. 31–37.

31. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Использование систем класса ГАТЛОСЭМИ для предупреждения причин возникновения ДТП и неблагоприятных социальных исходов в «умном городе» // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2016. № 1 (236). С. 65–81. DOI: 10.5862/JCSTCS.236.7

32. Шаталова Н.В. Развитие транспортной отрасли как основополагающей при решении проблем стратегического и экономического характера // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. 2017. Т. 1. С. 230–233.

Статья поступила в редакцию 30.06.2019.

REFERENCES

1. Coifman B., Dhoorjaty S. Event data-based traffic detector validation tests. *J. of Transportation Engineering*, 2004, Vol. 130(3), Pp. 313–321. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:3\(313\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(313))

2. Maghrour Zefreh M., Torok A. Single loop detector data validation and imputation of missing data, *Measurement*. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.066> (Accessed: 01.11.2017).

3. Laña I., Olabarrieta I. (Iñaki), Vélez M., Del Ser J. On the imputation of missing data for

road traffic forecasting: New insights and novel techniques. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, Vol. 90, Pp. 18–33. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.021>

4. Semwal D., Patil S., Galhotra S., Arora A., Unny N. STAR: Real-time spatiotemporal analysis and prediction of traffic insights using social media. *Proceedings of the 2nd IKDD Conference on Data Sciences*. Bangalore, India: ACM, 2015, P. 7 Available: <http://dx.doi.org/10.1145/2778865.2778872>

5. **Gutiérrez C., Figuerias P., Oliveira P., Costa R., Jardim-Goncalves R.** Twitter mining for traffic events detection. *2015 Science and Information Conference*. London, UK: IEEE, 2015, Pp. 371–378. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/SAI.2015.7237170>
6. **Seliverstov Y.A., Chigur V.I., Sazanov A.M., Seliverstov S.A., Svistunova A.S.** Sentiment Analysis of «AUTOSTRADA.INFO/RU» Users Comments. *SPIIRAS Proceedings*, 2019, Vol. 18(2), Pp. 354–389. Available: <https://doi.org/10.15622/sp.18.2.354-389>
7. **Rashidi T.H., Abbasi A., Maghrebi M., Hasan S., Waller T.S.** Exploring the capacity of social media data for modelling travel behaviour: Opportunities and challenges. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, Vol. 75, Pp. 197–211. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.008>
8. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov Sv.A., Komashinskiy V.I., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Grigoriev V.A.** Intelligent systems preventing road traffic accidents in megalopolises in order to evaluate. *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements*, 2017, Pp. 489–92. Available: <https://doi.org/10.1109/CTSIS.2017.8109528>
9. **Seliverstov Y.A., Seliverstov S.A., Malygin I.G., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Lukomskaya O.Y., Tishchenko I.P., Elyashevich A.M.** Development of management principles of urban traffic under conditions of information uncertainty. *Communications in Computer and Information Science*, 2017, Vol. 754, Pp. 399–41. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-65551-2_29
10. **Djahel S., Doolan R., Muntean G.-M., Murphy J.** A communications-oriented perspective on traffic Management Systems for Smart Cities: Challenges and innovative approaches. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 2015, Vol. 17(1), Pp. 125–151. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2014.2339817>
11. **Fu K., Nune R., Tao J.X.** Social media data analysis for traffic incident detection and management. *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, 2015, No. 15-4022. Available: <https://trid.trb.org/view/1338383>
12. **Gal-Tzur A., Grant-Muller S.M., Kuflik T., Minkov E., Nocera S., Shoor I.** The potential of social media in delivering transport policy goals. *Transport Policy*, 2014, No. 32, Pp. 115–123. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.01.007>
13. **Gal-Tzur A., Grant-Muller S.M., Minkov E., Nocera S.** The impact of social media usage on transport policy: Issues, challenges and recommendations. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2014, Vol. 111, Pp. 937–946. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.128>
14. **Gong Y., Deng F., Sinnott R.O.** Identification of (near) real-time traffic congestion in the cities of Australia through Twitter. *Proceedings of the ACM first international workshop on understanding the city with urban informatics*. Melbourne, Australia: ACM, 2015, Pp. 7–12. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/2811271.2811276>
15. **Zhenhua Zhang, Ming Ni, Qing He, Jing Gao.** *Final report. Mining transportation information from social media for planned and unplanned events*. University at Buffalo, SUNY & Transportation Informatics Tier I University Transportation Center, 2016, 68 p.
16. **Zhang Z., He Q., Gao J., Ni M.** A deep learning approach for detecting traffic accidents from social media data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, Vol. 86, Pp. 580–596. DOI: 10.1016/j.trc.2017.11.027
17. **Shelmanov A.O., Kamenskaya M.A., Ananyeva M.I., Smirnov I.V.** Semantic-syntactic analysis for question answering and definition extraction. *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2016, No. 4, Pp. 47–61. (rus)
18. **Kuznetsov A.N., Vyshemirskiy D.A.** One approach to solving tokenization problem for analysis of large-scale collections of user-defined passwords. *Bezopasnost informatsionnykh tekhnologiy [IT Security]*, 2017, No. 2, Pp. 50–60. (rus)
19. **Chen K., Zhang Z., Long J., Zhang H.** Turning from TF-IDF to TF-IGM for term weighting in text classification. *Expert Systems with Applications*, 2016, Vol. 66, Pp. 245–260. DOI: 10.1016/j.eswa.2016.09.009
20. **Bissan Ghaddar, Joe Naoum-Sawaya.** High dimensional data classification and feature selection using support vector machines. *European Journal of Operational Research*, 2018, Vol. 265, Iss. 3, Pp. 993–1004.
21. **Jimenez-Marquez J.L., Gonzalez-Carrasco I., Lopez-Cuadrado J.L., Ruiz-Mezcua B.** Towards a big data framework for analyzing social media content. *International Journal of Information Management*, 2019, Vol. 44, Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2018.09.003
22. **Bissan Ghaddar, Joe Naoum-Sawaya.** High dimensional data classification and feature selection using support vector machines. *European Journal of Operational Research*, 2018, Vol. 265, Iss. 3, Pp. 993–1004.
23. **Dey A., Jenamani M., Thakkar J.J.** Senti-N-Gram: An N-gram lexicon for sentiment analysis. *Expert Systems with Applications*, 2018, Vol. 103, Pp. 92–105. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.03.004

24. **Sizov A.A., Nikolenko S.I.** Naivnyy Bayesovskiy klassifikator. DOCPLAYER [Naive Bayes classifier. DOCPLAYER]. Available: <https://docplayer.ru/45424867-Naivnyy-bayesovskiy-klassifikator.html> (Accessed: 25.01.2019). (rus)
25. **Vorontsov K.V.** Veroyatnostnoye tematicheskoye modelirovaniye [Probabilistic thematic modeling]. Available: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/2/22/Voron-2013-ptm.pdf> (rus)
26. **Vorontsov K.V.** Lektsii po lineynym algoritmam klassifikatsii [Lectures on linear classification algorithms]. Available: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/68/voron-ML-Lin.pdf>
27. **Kim D., Seo D., Cho S., Kang P.** Multi-co-training for document classification using various document representations: TF-IDF, LDA, and Doc2Vec. *Information Sciences*, 2019, Vol. 477, Pp. 15–29.
28. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Review of megalopolis transportprovision indicators. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2015, No. 5 (52), Pp. 237–247. (rus)
29. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** O metode otsenki effektivnosti organizatsii protsessa dorozhnogo dvizheniya megalopolisa [On a method for assessing the effectiveness of the organization of the process of traffic in a megalopolis]. *Vestnik transporta Povolzhya*, 2015, No. 2 (50), Pp. 91–96. (rus)
30. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** The determination method of the subjective preferred route. *Izvestiya SPbGETU LETI*, 2016, Vol. 4. Pp. 31–37. (rus)
31. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** Use of GATLOSAMI to prevent causes of traffic accidents and adverse social accidents in a ‘SMART CITY’. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*, 2016, No. 1 (236), Pp. 65–81. DOI: 10.5862/JCSTCS.236.7. (rus)
32. **Shatalova N.V.** Razvitiye transportnoy otrasli kak osnovopolagayushchey pri reshenii problem strategicheskogo i ekonomicheskogo kharaktera [Development of the transport industry as fundamental in solving problems of a strategic and economic nature]. *Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse [Modernization and research in the transport sector]*, 2017, Vol. 1, Pp. 230–233. (rus)

Received 30.06.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

СЕЛИВЕРСТОВ Ярослав Александрович

SELIVERSTOV Yaroslav A.

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

НИКИТИН Кирилл Вячеславович

NIKITIN Kirill V.

E-mail: execiter@mail.ru

ШАТАЛОВА Наталья Викторовна

SHATALOVA Natalya V.

E-mail: shatillen@mail.ru

КИСЕЛЕВ Арсений Алексеевич

KISELEV Arseny A.

E-mail: ars8ars@mail.ru

DOI: 10.18721/JCSTCS.12302
УДК 534.44

УСТРОЙСТВО ОБНАРУЖЕНИЯ И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Е.В. Богатиков, А.Н. Шебанов, К.Э. Ангарита Лорес

Воронежский государственный университет,
Воронеж, Российская Федерация

Разработано устройство, регистрирующее ультразвук с частотой до 100 кГц, преобразующее его в звуковые колебания в реальном времени с задержкой менее 2 мс и воспроизводящее полученные звуковые колебания. Изменение частоты сигнала производится при помощи быстрого преобразования Фурье и выделения доминирующей частоты в режиме реального времени на микроконтроллере с ядром ARM Cortex M3. Сохранение огибающей импульсов с временным разрешением до 1,2 мс и хорошая чувствительность используемых МЭМС-микрофонов в ультразвуковой области позволяют применять устройство для обнаружения и классификации сигналов эхолокации животных. Низкая стоимость комплектующих и их доступность дают возможность эксплуатировать устройство в бытовой сфере для контроля работоспособности устройств, излучающих ультразвук, и для контроля за отсутствием ультразвуковых шумов, неблагоприятно влияющих на самочувствие человека при длительном воздействии.

Ключевые слова: ультразвук, микрофон, МЭМС, микроконтроллер, БПФ.

Ссылка при цитировании: Богатиков Е.В., Шебанов А.Н., Ангарита Лорес К.Э. Устройство обнаружения и цифровой обработки ультразвуковых сигналов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 25–36. DOI: 10.18721/JCSTCS.12302

ULTRASOUND DETECTION AND DIGITAL PROCESSING DEVICE

E.V. Bogatikov, A.N. Shebanov, C.E. Angarita Lores

Voronezh State University,
Voronezh, Russian Federation

The device has been developed that registers ultrasound with a frequency of up to 100 kHz, which converts it into sound in real time with a delay of less than 2 ms and reproduces the received sound. The signal frequency is changed using the fast Fourier transform and the selection of the dominant frequency in real time on a microcontroller with an ARM Cortex M3 core. The preservation of the pulse envelope with a time resolution of up to 1.2 ms and the good sensitivity of the used MEMS microphones in the ultrasound region make it possible to use the device for detecting and classifying animals' echolocation signals. The low cost of the used components and

their accessibility make it possible to use the device in the domestic sphere to monitor the performance of devices that emit ultrasound, and to monitor the absence of ultrasonic noise, which can adversely affect a person's well-being during prolonged exposure.

Keywords: ultrasound, microphone, MEMS, microcontroller, FFT.

Citation: Bogatkov E.V., Shebanov A.N., Angarita Lores C.E. Ultrasound detection and digital processing device. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 3, Pp. 25–36. DOI: 10.18721/JCSTCS.12302

Введение

Задача детектирования низкочастотного ультразвука (с частотой до 100 кГц) встречается при контроле качества работы различных устройств, оценке условий труда на рабочих местах [1–6], изучении животных, использующих ультразвук для общения или ориентации в пространстве [7–13].

Наиболее важные параметры ультразвукового детектора определяются, прежде всего, режимом детектирования (гетеродинирование, деление частоты, запись с последующим замедленным воспроизведением) и типом используемого микрофона. От режима детектирования зависит способность сохранять характеристики сигнала, такие как форма и частота следования ультразвуковых импульсов, характеристическая частота и параметры частотной модуляции. Худшие результаты имеет режим гетеродинирования, наилучшие – режим записи с последующим воспроизведением, однако он менее удобен из-за невозможности работы в режиме реального времени и большого объема данных. Режим деления частоты позволяет обеспечить компромисс между удобством работы и объемом извлекаемой информации. Тип используемого микрофона (электретный, МЭМС) определяет предельную частоту (обычно не менее 100 кГц) и чувствительность детектора.

Широкое распространение получили детекторы летучих мышей (bat detectors), которые применяются научно-исследовательскими и образовательными учреждениями, экологическими организациями и натуралистами-любителями. Стоимость специализированных приборов для детектирования и исследования эхолокации животных од-

ного из лидеров рынка – фирмы Pettersson Elektronik – составляет от 185 долл. США (простейший ультразвуковой детектор гетеродинного типа D100 с предельной частотой 120 кГц) до 4375 долл. США (профессиональный ультразвуковой детектор D1000X с предельной частотой 235 кГц, работающий в гетеродинном режиме, режиме деления частоты и режиме записи сигнала). Наряду с профессиональными приборами существуют любительские [14]. Они работают в режиме гетеродинирования из-за простоты его реализации. В таких детекторах происходит перемножающее смещение входного ультразвукового сигнала (детектируемого простым электретным микрофоном) с сигналом, генерируемым опорным генератором. Полученная разностная частота выводится на динамик. Подобные разработки просты, но имеют очень ограниченную сферу применения из-за того, что детектор определяет только факт наличия ультразвука, но не способен производить никакой параметризации сигнала.

В то же время существуют задачи, в которых полезна количественная информация о характере ультразвукового сигнала, но не требуется профессиональное качество оборудования. Такие задачи возникают, например, на начальных этапах научных исследований, в учебных задачах, а также в бытовой сфере.

Непрерывное совершенствование элементной базы (например, появление новых типов микрофонов), а также быстрый рост вычислительных возможностей микроконтроллеров, позволяют реализовать ультразвуковой детектор, работающий в ре-

жиме деления частоты, имеющий достаточно высокую чувствительность и широкие возможности в классификации ультразвуковых сигналов при низкой стоимости.

Наша цель — подбор элементной базы и разработка ультразвукового детектора, работающего в режиме деления частоты, а также поиск оптимальных параметров цифровой обработки ультразвукового сигнала с использованием современных массовых бюджетных микроконтроллеров.

Общая схема устройства

Общая схема разработанного устройства приведена на рис. 1. В качестве сенсора ультразвуковых колебаний используется МЭМС-микрофон фирмы Knowles, принадлежащий к серии SiSonic [15]. Поликремниевая диафрагма данных микрофонов имеет однородно высокую чувствительность в широком диапазоне частот (в спецификации приведены данные до 80 кГц) и позволяет

применять их в ультразвуковых приложениях [16, 17]. При этом микрофоны серии SiSonic ориентированы на массовое применение и имеют низкую стоимость (менее 1 долл. США). При испытании устройства использовались модели микрофонов SPU0410LR5H и SPU0410HR5H. Микрофон SPU0410HR5H имеет верхнее (т. е. в крышке корпуса) расположение акустического отверстия и меньшее количество контактов, что обеспечивает его преимущество по сравнению с SPU0410LR5H в простоте монтажа. Как видно из рис. 2 а, микрофон SPU0410LR5H требует при монтаже точного позиционирования из-за нижнего (т. е. на стороне контактных площадок) расположения акустического отверстия, однако в его спецификации присутствуют данные о чувствительности в ультразвуковой области частот, в отличие от модели SPU0410HR5H. В качестве контрольного сенсора использовался обычный электретный микрофон ECM-60А.

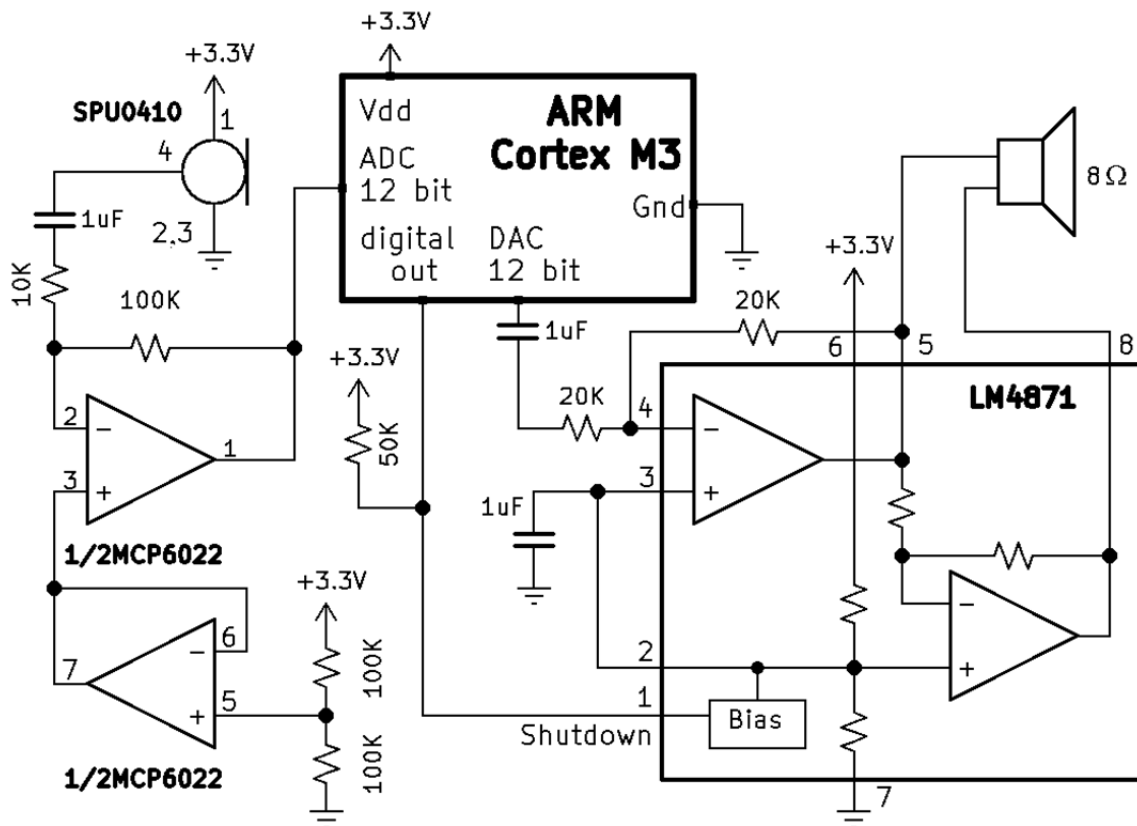


Рис. 1. Общая схема детектора ультразвука
Fig. 1. General scheme of the ultrasound detector

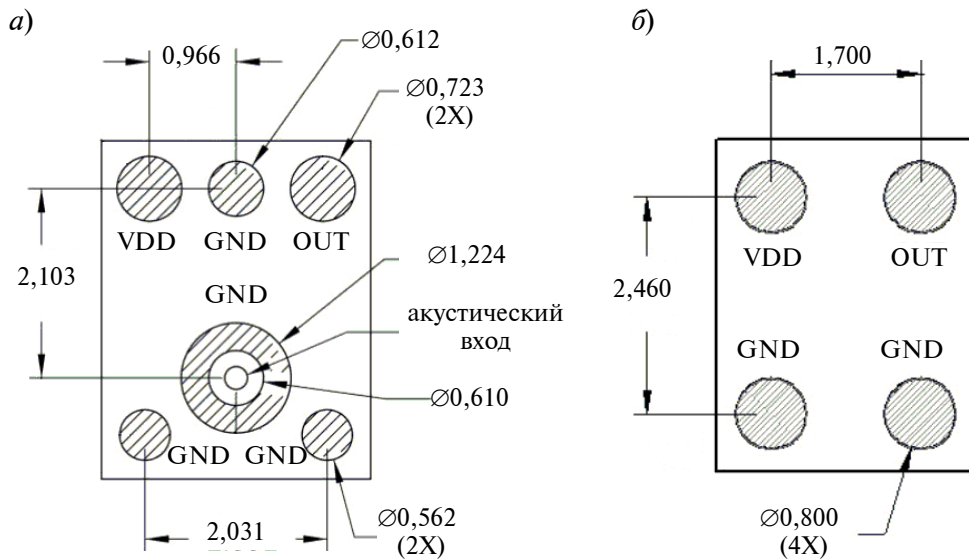


Рис. 2. Цоколевка микрофонов: *a* – SPU0410LR5H; *б* – SPU0410HR5H
 Fig. 2. Microphones pinouts: *a* – SPU0410LR5H; *б* – SPU0410HR5H

Благодаря высокой чувствительности используемых МЭМС-микрофонов возможно использование простейшего инвертирующего усилителя на операционном усилителе (ОУ), имеющем достаточно широкую полосу пропускания. Например, на сдвоенном ОУ МСР6022, ширина полосы пропускания которого при единичном усилении составляет 10 МГц. Данный усилитель имеет низкую спектральную плотность напряжения шума на входе, равную 8,7 нВ/√Гц, а наличие двух операционных усилителей в составе МСР6022 позволяет также реализовать эффективный источник опорного напряжения.

Усиленный сигнал подается на вход АЦП в составе микроконтроллера на базе ядра Cortex-M3, обеспечивающего требуемое быстродействие. Это может быть микроконтроллер Atmel SAM3X8E, входящий в состав платформы Arduino Due (если требуется быстрое прототипирование), или STM32F103C8, имеющий большое количество доступных отладочных плат (если требуется оптимальное отношение цена/качество), или К1986ВЕ92QI, разработанный отечественной компанией АО «ПКК Миландр» (если решаются, например, задачи импортозамещения) [18–20].

В любом случае, микроконтроллер имеет АЦП со скоростью выборки не менее 512 тыс. преобразований в секунду, что вполне достаточно для поставленной задачи. Также данные микроконтроллеры имеют в своем составе ЦАП, позволяющий выводить обработанные данные на усилитель мощности.

В качестве усилителя мощности используется микросхема LM4871, обладающая рядом преимуществ: минимальное количество внешних элементов, низкое напряжение питания (от 2 до 5,5 В), работа на низкоомную нагрузку (до 8 Ом при мощности 1,5 Вт), наличие энергосберегающего режима с током покоя 0,6 мкА.

Алгоритм работы устройства

Общий алгоритм работы микроконтроллера, обеспечивающий цифровую обработку входного сигнала, представлен на рис. 3. При накоплении очередных N отсчетов входной сигнал подвергается быстрому преобразованию Фурье (БПФ) [21, 22]. В найденном спектре мощности для области частот выше 20 кГц находится доминирующая частота с максимальной амплитудой. Вычисленные значения частоты и амплитуды используются при генерации выходного

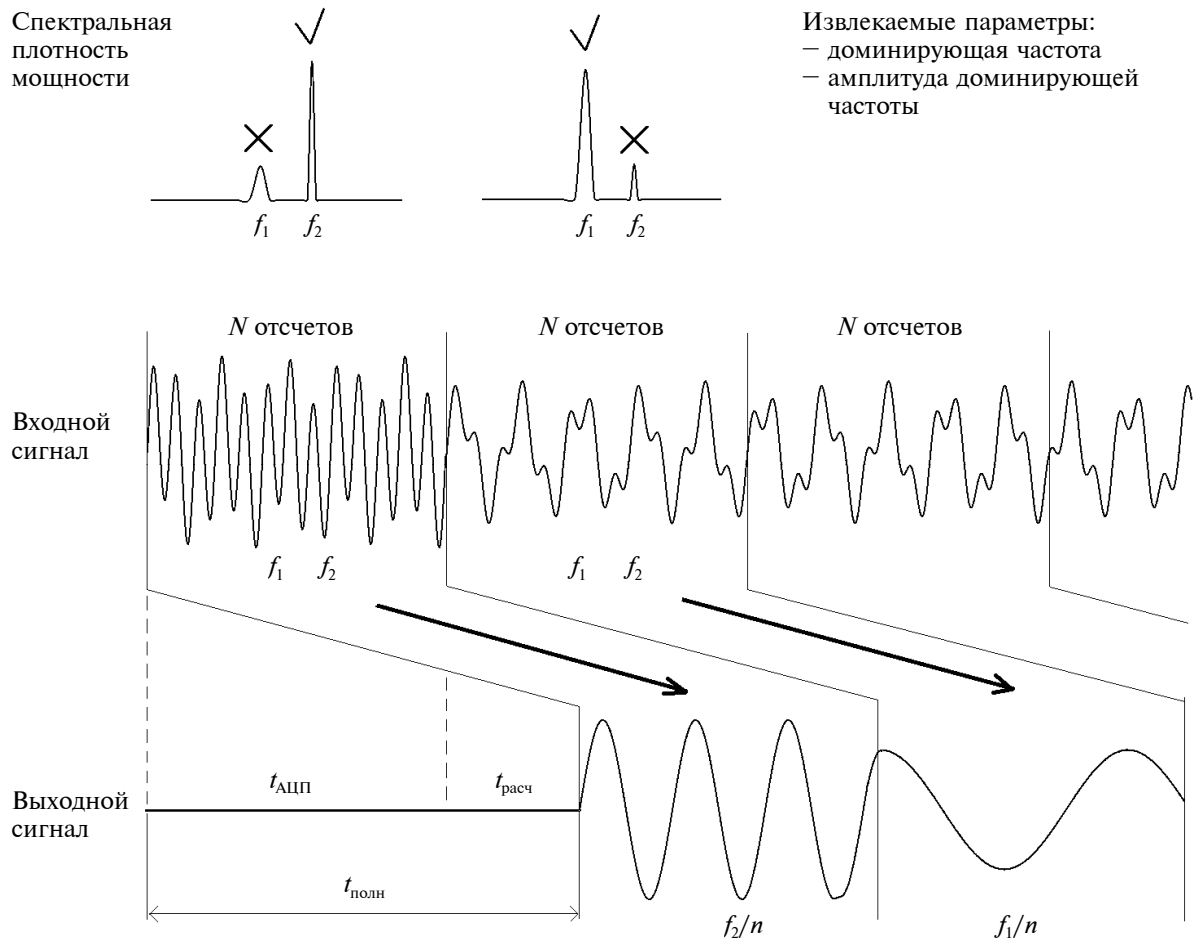


Рис. 3. Общий алгоритм цифровой обработки сигнала в детекторе ультразвука

Fig. 3. General algorithm for digital signal processing in the ultrasound detector

сигнала. Частота выходного сигнала предварительно делится на заданный множитель (далее используются множитель 10). Выходной сигнал генерируется на основе таблично заданной синусоиды. В моменты изменения частоты выходного сигнала обеспечивается сшивка фазы и амплитуды сигнала для устранения звуковых искажений. Более подробное описание алгоритма приведено ниже.

Алгоритм

Переменные и параметры: CurAmp (текущая амплитуда), DestAmp (требуемая амплитуда), Freq (требуемая выходная частота), SinCache (таблица значений одного периода синуса), SinIndex (текущий индекс в таблице значений синуса), PhaseDiff (приращение фазы), PhaseDiv (коэффици-

ент изменения фазы, зависящий от DACdiv), OutSignal (амплитуда выходного сигнала в кодах ЦАП), AmpStep (шаг изменения амплитуды), DACdiv (коэффициент деления частоты), SinCount (размер таблицы значений синуса), NoiseLvl (минимальная амплитуда входного сигнала, не считающаяся шумом).

Инициализация:

1. SinCount \leftarrow 100.
2. Цикл по i от 0 до SinCount – 1 с шагом 1.
3. SinCache[i] \leftarrow 2047.0 \times sin($2 \times \text{PI} \times i / \text{SinCount}$) // Заполнение целочисленной таблицы SinCache значениями, приведенными к диапазону, соответствующему диапазону изменения кодов 12-битного ЦАП.
4. Конец цикла

5. $\text{AmpStep} \leftarrow 1$; $\text{DACdiv} \leftarrow 10$
6. Выполнить подпрограмму «Настройка АЦП».
7. Выполнить подпрограмму «Настройка ЦАП».
8. Выполнить подпрограмму «Настройка таймеров».
9. Настройка обработчика прерываний «Вывод данных в ЦАП».

Основная программа (в бесконечном цикле):

1. Если буфер заполнен, то
2. Выполнить FFT.
3. Найти частоту с максимальной амплитудой.
4. Обновить значения Freq и DestAmp .
5. Если $\text{DestAmp} < \text{NoiseLvl}$, то
6. Установить значение DestAmp равным 0
7. **Конец если**
8. Если есть данные в буфере COM-порта, то
9. Считать из буфера новые значения AmpStep и DACdiv .

Обработчик прерываний «Вывод данных в ЦАП»:

1. $\text{PhaseDiff} \leftarrow \text{PhaseDiff} + \text{Freq} \times \text{SinCount}$ // расчет приращения фазы с учетом предыдущего приращения, не учтенного в изменении индекса таблицы значений синуса.
2. $\text{SinIndex} \leftarrow (\text{SinIndex} + \text{PhaseDiff} / \text{PhaseDiv}) \% \text{SinCount}$ // здесь и далее «%» – остаток от деления нацело.
3. $\text{PhaseDiff} \leftarrow \text{PhaseDiff} \% \text{PhaseDiv}$ // расчет приращения фазы, не учтенного при изменении SinIndex (т. к. реальное изменение индекса всегда целочисленное, при том что изменение фазы соответствует дробному изменению индекса).
4. $\text{OutSignal} \leftarrow 2047 + ((\text{SinCache} [\text{SinIndex}] \times \text{CurAmp}) \gg 11)$
5. Установить новое значение амплитуды ЦАП.
6. Если $\text{CurAmp} > \text{DestAmp}$, то
7. $\text{CurAmp} \leftarrow \text{CurAmp} - \text{AmpStep}$
8. Если $\text{CurAmp} < \text{NoiseLvl}$ и $\text{DestAmp} = 0$, то
9. Выключить усилитель мощности.
10. **Иначе, Если** $\text{CurAmp} < \text{DestAmp}$

11. Включить усилитель мощности.
12. $\text{CurAmp} \leftarrow \text{CurAmp} + \text{AmpStep}$
13. **Конец Если**

Приведенный алгоритм был реализован для микроконтроллера семейства SAM3X8E (в составе платформы Arduino Due). Использовалась библиотечная реализация БПФ (библиотека SplitRadixRealP).

Испытание устройства

Для испытания разработанного устройства в качестве тестового источника ультразвуковых сигналов взяли ультразвуковой дальномер HC-SR04, генерирующий импульсы с частотой ~ 40 кГц и управляемый Arduino Uno [23]. При испытании периодичность следования ультразвуковых импульсов составляла 5 мс, расстояние между источником ультразвука и микрофоном составляла 1 м, уровень усиления выходного сигнала микрофона был равен 20 дБ.

Для сравнения чувствительности микрофонов (совместно с предусилителем) в ультразвуковой области измерили зависимость от расстояния отклика устройства на сигнал с частотой 40 кГц, генерируемый HC-SR04. Измерение при различных расстояниях производилось для того, чтобы избежать возможного влияния ревербераций. Полученные результаты приведены на рис. 4. Аппроксимирующие кривые соответствуют зависимости $S = S_0 / d$, где S – отклик предусилителя в мВ, S_0 – отклик предусилителя на расстоянии 1 м, d – расстояние между источником ультразвука и микрофоном. Анализ полученной зависимости показывает, что для частоты 40 кГц чувствительность микрофона SPU0410HR5H превышает чувствительность микрофона ЕСМ-60А на 20 дБ, а чувствительность микрофона SPU0410LR5H превышает чувствительность микрофона ЕСМ-60А на 35,5 дБ. Причина различной чувствительности МЭМС-микрофонов, изготовленных по одинаковой технологии SiSonic, заключается, видимо, в расположении входного акустического отверстия. Как показано в работе [16], при верхнем расположении акустического отверстия резонансная частота сенсора

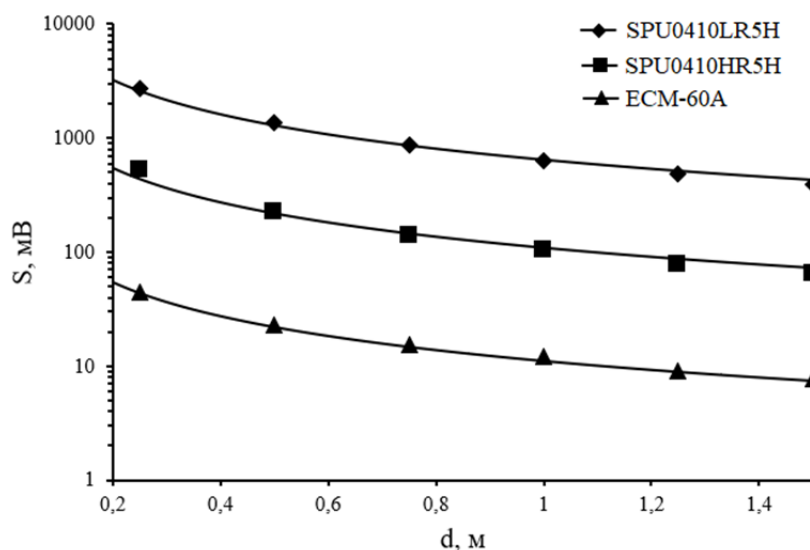


Рис. 4. Зависимость отклика предусилителя от расстояния между источником ультразвука (частота 40 кГц) и микрофоном

Fig. 4. Dependence of the preamplifier response on the distance between the ultrasound source (frequency 40 kHz) and the microphone

Таблица 1

Параметры используемых микрофонов

Table 1

Parameters of microphones used

Параметр	Микрофон		
	SPU0410 LR5H	SPU0410 HR5H	ECM-60A
Уровень чувствительности, дБВ/Па ($f = 1$ кГц)	-38 ± 1	-42 ± 1	-36 ± 1
Уровень чувствительности, дБВ/Па ($f = 40$ кГц)	-40 ± 1	$-55,5 \pm 1$	$-75,5 \pm 1$
Чувствительность, мВ/Па ($f = 40$ кГц)	88	15	1,5
Уровень собственных шумов, дБ ($f = 1$ кГц)	31	35	34
Собственный шум, мкВ	80	80	140
Динамический диапазон, дБ ($f = 1$ кГц)	87	87	86

сдвигается в область более низких частот по сравнению с микрофонами, имеющими ниже расположение акустического отверстия. Это приводит к ухудшению равномерности частотного отклика в диапазоне звуковых частот и существенному снижению чувствительности в ультразвуковой области.

Сравнение параметров используемых микрофонов приведено в табл. 1. Уровень чувствительности для $f = 1$ кГц и $f = 40$ кГц рассчитан на основании проведенных измерений, остальные параметры определены на

основании спецификаций [15]. Необходимо отметить, что собственный шум всех используемых микрофонов существенно превышает шум операционного усилителя ($\sim 2,5$ мкВ для диапазона частот 20–80 кГц), которым можно пренебречь. При этом разрешение по напряжению 12-битного АЦП используемого микроконтроллера, равное 805 мкВ, соответствует уровню шума на выходе микрофонного усилителя при уровне усиления 20 дБ. Таким образом, использование дополнительного АЦП с более высоким разрешением не требуется.

Таблица 2

**Время выполнения операций
микроконтроллером семейства SAM3X8E**

Table 2

**The execution time of operations
by the microcontroller of the SAM3X8E family**

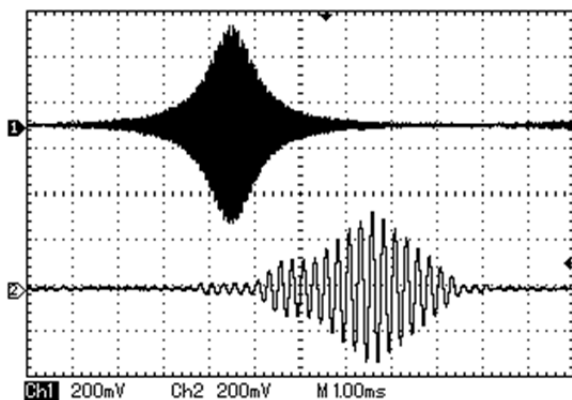
N	$t_{\text{расч}}$, мс	$t_{\text{АЦП}}$ при $f_d=200$ кГц, мс	$t_{\text{полн}}$, мс
64	0,31	0,32	0,63
128	0,58	0,64	1,22
256	1,10	1,28	2,38
512	2,28	2,56	4,84
1024	5,05	5,12	10,17

Для определения оптимальной частоты дискретизации при накоплении данных, а также допустимой длины выборки N определялась производительность разработанной прошивки микроконтроллера. Условием стабильной работы алгоритма без потери входных данных является $t_{\text{расч}} < t_{\text{АЦП}}$, где $t_{\text{расч}}$ – время выполнения БПФ и других вспомогательных операций, $t_{\text{АЦП}}$ – время накопления N отсчетов. Для используемой библиотеки вычисления БПФ данное усло-

вие выполняется только при частоте дискретизации f_d , не превышающей 200 кГц (табл. 2). Время расчета хорошо соответствует зависимости $t_{\text{расч}} = C \cdot \log_2(N)$, однако при $N < 128$ существенный вклад во время расчета вносят вспомогательные операции, что приводит к росту множителя C . При $N = 64$ $t_{\text{расч}} \approx t_{\text{АЦП}}$ и использование такой длины выборки нежелательно из-за возможной потери данных.

Сравнение точности воспроизведения формы сигнала при $N = 128$ и $N = 256$ показывает, что предпочтительной является длина выборки $N = 128$, обеспечивающая стабильность вычислений без потери данных, точность в детектировании доминирующей частоты и амплитуды, а также позволяющая быстрее реагировать на изменение амплитуды входного сигнала по сравнению с $N = 256$. Осциллограммы тестирования алгоритма приведены на рис. 5 (входной сигнал подавался непосредственно на вход АЦП с выхода функционального генератора). Пример работы алгоритма в условиях частотной модуляции сигнала приведен на рис. 6.

a)



b)

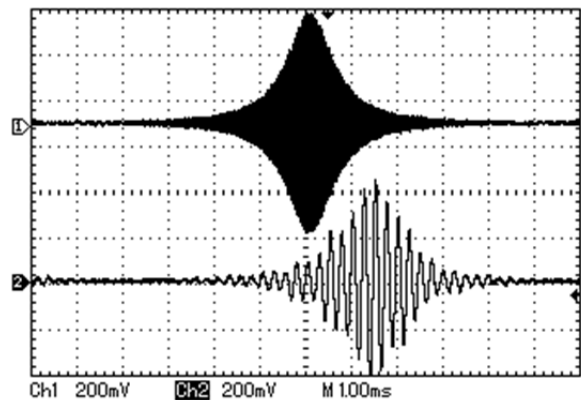


Рис. 5. Тестирование воспроизводимости амплитудной модуляции сигнала при делении частоты для количества отсчетов БПФ $N = 256$ (a) и $N = 128$ (б); на осциллограммах сверху – входной сигнал, снизу – выходной сигнал

Fig. 5. Testing the reproducibility of the amplitude modulation of the signal when the frequency is divided for the number of FFT samples $N = 256$ (a) and $N = 128$ (b); on oscillograms from above – input signal, from below – output signal

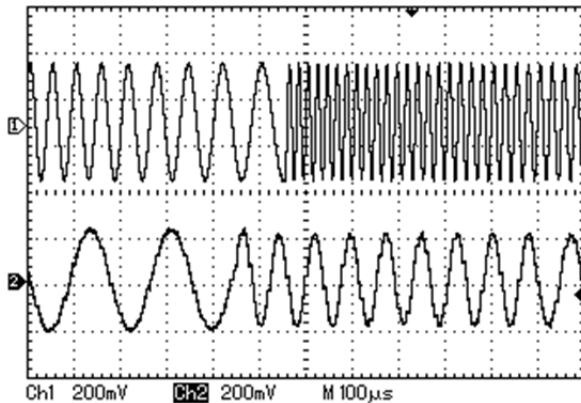


Рис. 6. Тестирование воспроизводимости частотной модуляции сигнала; коэффициент деления частоты $n = 3$, количество отсчетов БПФ $N = 128$

Fig. 6. Testing the reproducibility of the frequency modulation of the signal; the frequency division factor $n = 3$, the number of FFT samples $N = 128$

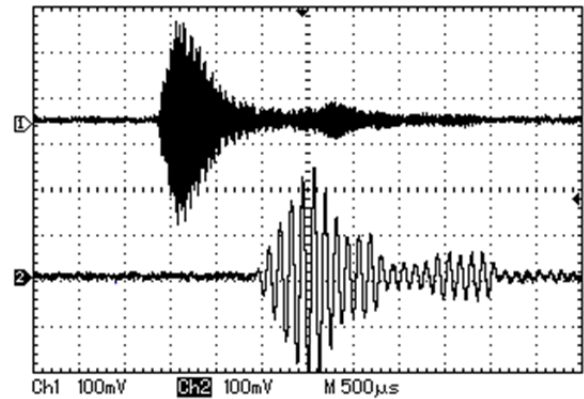


Рис. 7. Результаты испытания готового устройства, микрофон SPU0410LR5H, $f_d=200$ кГц, $N = 128$, $n = 5$

Fig. 7. Test results of the completed device, microphone SPU0410LR5H, $f_d = 200$ kHz, $N = 128$, $n = 5$

Результаты испытания готового устройства (собранного согласно схеме на рис. 1) приведены на рис. 7. В качестве источника ультразвука использован дальномер HC-SR04. Видно достаточно хорошее воспроизведение огибающей входного сигнала, а также высокая чувствительность, позволяющая воспроизводить не только первичный, но и двукратно отраженный сигнал. Запаздывание выходного сигнала относительно входного соответствует данным из табл. 2. Скачки амплитуды и фазы на границах выборок отсутствуют.

Заключение

Полученные значения чувствительности ультразвукового детектора позволяют использовать устройство как при оценке загрязнения окружающего пространства ультразвуком (согласно СанПиН 2.2.4/2.1.8.582-96 предельно допустимый уровень низкочастотного ультразвука составляет 75 дБ), так и для детектирования эхолокации животных (уровень сигналов эхолокации летучих мышей достигает 120–130 дБ [8]), причем функция сохранения формы сигнала с разрешением по

времени $\sim 1,2$ мс позволяет применять прибор и в исследовательских целях (длительность импульсов эхолокации летучих мышей составляет от 3 до 65 мс [9] при частоте от 16 до 80 кГц с вариацией частоты от единиц до десятков процентов).

Анализ стоимости и функциональности разработанного устройства показывает, что при стоимости комплектующих ~ 15 долл. США, сопоставимой со стоимостью любительских разработок, действующих по принципу гетеродинамирования (стоимость компонентов ~ 5 долл. США), функциональность устройства сопоставима с профессиональными устройствами начального уровня стоимостью ~ 200 –400 долл. США.

Низкая стоимость разработанного устройства позволяет расширить область его применения, например, за счет бытовой сферы (контроль работоспособности ультразвуковых отпугивателей грызунов и насекомых или других приборов, использующих ультразвук). При необходимости функционал устройства может быть расширен сохранением оцифровываемых данных на внешние устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Howard C.Q., Hansen C.H., Zander A.C.** Review of current recommendations for airborne ultrasound exposure limits // Proc. of ACOUSTICS 2005 Conf. Pp. 341–343.
2. **Lenhardt M.L.** Airborne ultrasonic standards for hearing protection // Proc. of 9th Internat. Congress on Noise as a Public Health Problem. 2008. Pp. 842–848.
3. **Paxton B., Harvie-Clark B.** Public exposure to very high frequency sound and ultrasound: do we know the risks? // Proc. of the Institute of Acoustics. 2016. Vol. 38. No. 1. Pp. 400–407.
4. **Fletcher M.D., Jones S.L., White P.R., Dolder C.N., Lineton B., Leighton T.G.** Public exposure to ultrasound and very high-frequency sound in air // The J. of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 144. No. 4. Pp. 2554–2564. DOI: 10.1121/1.5063817
5. **Duck F., Leighton T.** Frequency bands for ultrasound, suitable for the consideration of its health effects // The J. of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 144. No. 4. Pp. 2490–2500. DOI: 10.1121/1.5063578
6. **Radosz J., Pleban D.** Ultrasonic noise measurements in the work environment // The J. of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 144. No. 4. Pp. 2532–2538. DOI: 10.1121/1.5063812
7. **Hopp S.L., Owren M.J., Evans C.S.** Animal acoustic communication: sound analysis and research methods. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 421 p. DOI: 10.1007/978-3-642-76220-8
8. **Surlykke A., Kalko E.K.V.** Echolocating bats cry out loud to detect their prey // PLoS ONE. 2008. Vol. 3. No. 4. Pp. 1–10. DOI: 10.1371/journal.pone.0002036
9. **MacSwiney M.C., Clarke F.M., Paul A.R.** What you see is not what you get: the role of ultrasonic detectors in increasing inventory completeness in Neotropical bat assemblages // J. of Applied Ecology. 2008. Vol. 45. Pp. 1364–1371. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2008.01531.x
10. **Adler M.J., Newman C.M., Sutter C.L., Ebeling C., Ribe C., West P.** System and method for detecting bats and their impact on wind facilities // U.S. Patent 8,379,486. 2013.
11. **Kerbiriou C., Bas Y., Viol I., Lorrilliere R., Mougnot J., Julien J.F.** Bat pass duration measurement: an indirect measure of distance of detection // Diversity. 2019. Vol. 11. No. 3. DOI: 10.3390/d11030047
12. **Chesmore E.D.** Application of time domain signal coding and artificial neural networks to passive acoustical identification of animals // Applied Acoustics. 2001. Vol. 62. Pp. 1359–1374. DOI: 10.1016/S0003-682X(01)00009-3
13. **Ahlen I., Baagoe H.J.** Use of ultrasound detectors for bat studies in Europe: experiences from field identification, surveys and monitoring // Acta Chiropterologica. 1999. Vol. 1. No. 2. Pp. 137–150.
14. **Berber J.** Build a bat detector // Nuts and Volts. 2001. No. 6. Pp. 30–34.
15. **SiSonic Surface Mount MEMS Microphones** // URL: <https://www.knowles.com/subdepartment/dpt-microphones/subdpt-sisonic-surface-mount-mems> (Дата обращения: 10.07.2019).
16. **Grigor'ev D.M., Godovitsyn I.V., Amelichev V.V., Generalov S.S.** Finite element simulation of frequency response of MEMS-microphone // Russian Microelectronics. 2018. Vol. 47. No. 3. Pp. 211–216.
17. **Сысоева С.** МЭМС-микрофоны // Компоненты и технологии. 2010. Т. 108. № 7. С. 72–78.
18. **Abdrakhmanov V.K., Salikhov R.B., Vazhdaev K.V.** Development of a sound recognition system using STM32 microcontrollers for monitoring the state of biological objects // Proc. of the 14th Internat. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. 2018. Vol. 8. Pp. 170–173.
19. **Шумилин С.** Новая серия отечественных 32-разрядных высокопроизводительных микроконтроллеров семейства 1986 на базе процессорного ядра ARM Cortex-M3 // Компоненты и технологии. 2008. № 10. С. 60–64.
20. **Володин В.Д., Шаронов А.А., Мозжегов К.С.** Отечественная элементная база. Отладочные комплекты // Master's Journal. 2016. № 2. С. 166–175.
21. **Karpis O.** FFT on ARM-based low-power microcontrollers // Internat. J. of Engineering Research and Development. 2013. Vol. 6. № 9. Pp. 67–72.
22. **Roscoe A., Sklaschus T., Oldroyd G., Blair S.M., Burt G.** Measurement of 40 power system harmonics in real-time on an economical ARM Cortex-M3 platform // Electronics Letters. 2013. Vol. 49. No. 23. Pp. 1475–1476. DOI: 10.1049/el.2013.0299
23. **Zhmud V.A., Kondratiev N.O., Kuznetsov K.A., Trubin V.G., Dimitrov L.V.** Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics // J. of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. P. 032189. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032189

Статья поступила в редакцию 09.07.2019.

REFERENCES

1. Howard C.Q., Hansen C.H., Zander A.C. Review of current recommendations for airborne ultrasound exposure limits. *Proceedings of ACOUSTICS 2005 Conference*, 2005, Pp. 341–343.
2. Lenhardt M.L. Airborne ultrasonic standards for hearing protection. *Proceedings of 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem*, 2008, Pp. 842–848.
3. Paxton B., Harvie-Clark B. Public exposure to very high frequency sound and ultrasound: do we know the risks? *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 2016, Vol. 38, No. 1, Pp. 400–407.
4. Fletcher M.D., Jones S.L., White P.R., Dolder C.N., Lineton B., Leighton T.G. Public exposure to ultrasound and very high-frequency sound in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, Vol. 144, No. 4, Pp. 2554–2564. DOI: 10.1121/1.5063817
5. Duck F., Leighton T. Frequency bands for ultrasound, suitable for the consideration of its health effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, Vol. 144, No. 4, Pp. 2490–2500. DOI: 10.1121/1.5063578
6. Radosz J., Pleban D. Ultrasonic noise measurements in the work environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, Vol. 144, No. 4, Pp. 2532–2538. DOI: 10.1121/1.5063812
7. Hopp S.L., Owren M.J., Evans C.S. *Animal acoustic communication: Sound analysis and research methods*. Berlin: Springer-Verlag, 1998, 421 p. DOI: 10.1007/978-3-642-76220-8
8. Surlykke A., Kalko E.K.V. Echolocating bats cry out loud to detect their prey. *PLoS ONE*, 2008, Vol. 3, No. 4, Pp. 1–10. DOI: 10.1371/journal.pone.0002036
9. MacSwiney M.C., Clarke F.M., Paul A.R. What you see is not what you get: the role of ultrasonic detectors in increasing inventory completeness in Neotropical bat assemblages. *Journal of Applied Ecology*, 2008, Vol. 45, Pp. 1364–1371. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2008.01531.x
10. Adler M.J., Newman C.M., Sutter C.L., Ebeling C., Ribe C., West P. System and method for detecting bats and their impact on wind facilities. *U.S. Patent 8,379,486*, 2013.
11. Kerbiriou C., Bas Y., Viol I., Lorrilliere R., Mognot J., Julien J.F. Bat pass duration measurement: an indirect measure of distance of detection. *Diversity*, 2019, Vol. 11, No. 3. DOI: 10.3390/d11030047
12. Chesmore E.D. Application of time domain signal coding and artificial neural networks to passive acoustical identification of animals. *Applied Acoustics*, 2001, Vol. 62, Pp. 1359–1374. DOI: 10.1016/S0003-682X(01)00009-3
13. Ahlen I., Baagoe H.J. Use of ultrasound detectors for bat studies in Europe: experiences from field identification, surveys and monitoring. *Acta Chiropterologica*, 1999, Vol. 1, No. 2, Pp. 137–150.
14. Berber J. Build a bat detector. *Nuts and Volts*, 2001, No. 6, Pp. 30–34.
15. SiSonic Surface Mount MEMS Microphones, Available: <https://www.knowles.com/subdepartment/dpt-microphones/subdpt-sisonic-surface-mount-mems> (Accessed: 10.07.2019).
16. Grigor'ev D.M., Godovitsyn I.V., Amelichev V.V., Generalov S.S. Finite element simulation of frequency response of MEMS-microphone. *Russian Microelectronics*, 2018, Vol. 47, No. 3, Pp. 211–216.
17. Sysoyeva S. MEMS-mikrofony [MEMS-microphones]. *Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]*, 2010, Vol. 108, No. 7, Pp. 72–78. (rus)
18. Abdrakhmanov V.K., Salikhov R.B., Vazhdaev K.V. Development of a sound recognition system using STM32 microcontrollers for monitoring the state of biological objects. *Proceedings of the 14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering*, 2018, Vol. 8, Pp. 170–173.
19. Shumilin S. Novaya seriya otechestvennykh 32-razryadnykh vysokoproizvoditelnykh mikrokontrollerov semeystva 1986 na baze protsessornogo yadra ARM Cortex-M3 [New series of Russian 32-bit high-performance microcontrollers from the 1986 family based on the ARM Cortex-M3 processor core]. *Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]*, 2008, No. 10, Pp. 60–64. (rus)
20. Volodin V.D., Sharonov A.A., Mozhgorov K.S. Otechestvennaya elementnaya baza. Otladochnyye komplekty [Russian element base. Debug kits]. *Master's Journal*, 2016, No. 2, Pp. 166–175.
21. Karpis O. FFT on ARM-based low-power microcontrollers. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2013, Vol. 6, No. 9, Pp. 67–72.
22. Roscoe A., Sklaschus T., Oldroyd G., Blair S.M., Burt G. Measurement of 40 power system harmonics in real-time on an economical ARM Cortex-M3 platform. *Electronics Letters*, 2013, Vol. 49, No. 23, Pp. 1475–1476. DOI: 10.1049/el.2013.0299

23. **Zhmud V.A., Kondratiev N.O., Kuznetsov K.A., Trubin V.G., Dimitrov L.V.** Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1015, P. 032189. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032189

Received 09.07.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

БОГАТИКОВ Евгений Васильевич

BOGATIKOV Evgenii V.

E-mail: evbogatikov@yandex.ru

ШЕБАНОВ Александр Николаевич

SHEBANOV Alexandr N.

E-mail: anshebanov@hotmail.com

АНГАРИТА Лорес Карлос Эдуардо

ANGARITA Lores Carlos Eduardo

E-mail: loresruizlozano@gmail.com

DOI: 10.18721/JCSTCS.12303
УДК 621.391.8

ПОВЫШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ DVB-S2 ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ СИГНАЛОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ И ФИНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Тан Хоанг Фьюк Нгуен, А.Л. Гельгор

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены постановка и решение оптимизационных задач синтеза импульса для многокомпонентных спектрально-эффективных сигналов с учетом заданной спектральной маски. Предложено решение для разных типов оптимизационных задач, включающих максимизацию свободного евклидова расстояния и минимизацию коэффициентов парциальной корреляции. Спектральная маска и другие параметры для помехоустойчивых кодеров LDPC и BCH взяты из стандарта DVB-S2. Разработана имитационная модель системы DVB-S2, в которой RRC-импульсы заменяются полученными финитными оптимальными импульсами для повышения спектральной эффективности системы. По результатам моделирования показано, что переход от RRC-импульсов к многокомпонентным оптимальным импульсам приводит к повышению спектральной эффективности на 10 % при энергетических потерях около 0,1 и 0,25 дБ для QPSK и 8PSK соответственно.

Ключевые слова: спектральная эффективность, сигнал с частичным откликом, оптимальный финитный импульс, многокомпонентные сигналы, DVB-S2.

Ссылка при цитировании: Нгуен Тан Хоанг Фьюк, Гельгор А.Л. Повышение спектральной эффективности DVB-S2 путём применения сигналов с управляемой интерференцией и финитными импульсами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 37–47. DOI: 10.18721/JCSTCS.12303

IMPROVING SPECTRAL EFFICIENCY OF DVB-S2 BY USING SIGNALS WITH CONTROLLED INTERSYMBOL INTERFERENCE AND FINITE PULSES

Tan Hoang Phuoc Nguyen, A.L. Gelgor

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

This paper considers the formulation and solution of the optimization problems for pulse synthesis for multicomponent bandwidth-effective signals taking into account a given frequency mask. A solution is proposed for various types of optimization problems, including maximizing the free Euclidean distance and minimizing the partial correlation coefficients. The frequency mask and other parameters for error correcting LDPC and BCH encoders are taken from the DVB-S2 standard. A simulation model of the DVB-S2 system is proposed, in which RRC pulses are replaced by obtained finite optimal pulses to improve the bandwidth efficiency of the system. The simulation results show that the transition from RRC pulses to multicomponent optimal pulses leads to an increase of bandwidth efficiency by 10 %, but the system suffers the energy losses of about 0.1 and 0.25 dB for QPSK and 8PSK, respectively.

Keywords: bandwidth efficiency, partial response signaling, optimal finite pulses, multi-component signals, DVB-S2.

Citation: Nguyen Tan Hoang Phuoc, Gelgor A.L. Improving spectral efficiency of DVB-S2 by using signals with controlled intersymbol interference and finite pulses. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 3, Pp. 37–47. DOI: 10.18721/JCSTCS.12303

Введение

Одним из ключевых факторов, обуславливающих разработку новых телекоммуникационных систем, является повышение спектральной эффективности. Большинство действующих в настоящее время систем передачи информации используют ортогональные сигналы или, что то же самое, сигналы с полным откликом (Full Response Signaling), например, на основе RRC-импульсов (Root Raised Cosine, форма спектра одного из таких импульсов имеет вид корня из приподнятого косинуса) в случае одночастотных сигналов. Это обеспечивает отсутствие межсимвольной интерференции (МСИ) при приеме сигналов.

В [1–3] для одночастотных систем вместо сигналов с полным откликом предлагается использовать сигналы с частичным откликом (Partial Response Signaling). Возможны два подхода. Первый из них, обычно называемый «Быстрее, чем Найквист» (Faster than Nyquist – FTN), предусматривает увеличение модуляционной скорости при сохранении формы модуляционного импульса, при этом становится невозможным полное устранение МСИ при приеме сигналов. Второй подход, не имеющий особого названия, заключается в сохранении модуляционной скорости и в выборе специальных форм импульса, обеспечивающих высокую степень компактности спектра и одновременно также невозможность полного устранения МСИ при приеме. Заметим, что в обоих вариантах сигналов с частичным откликом добиваются повышения спектральной эффективности, определяемой как отношение скорости передачи информации к ширине занимаемой полосы частот. Сигналы FTN являются частным случаем сигналов с частичным откликом и, таким образом, разница

в названиях нужна лишь для конкретизации особенностей формирования сигналов. Для того чтобы подчеркнуть осознанность отказа от возможности устранения МСИ при приеме, сигналы с частичным откликом часто называют сигналами с управляемой интерференцией.

Из-за наличия управляемой МСИ для приема сигналов с частичным откликом требуются более сложные алгоритмы приема. Долгое время именно невозможность или крайне высокая сложность практической реализации таких алгоритмов была, по-видимому, основным сдерживающим фактором для широкого распространения сигналов с частичным откликом. Однако последние достижения в области электронных компонентов позволяют ожидать скорое начала применения спектрально-эффективных сигналов с управляемой МСИ в системах передачи информации.

В работах [4–6] представлены методы поиска оптимальных форм импульса, обеспечивающих максимальную компактность спектра сигналов с частичным откликом при фиксированных энергетических потерях. В качестве меры компактности спектра используется ширина полосы частот, содержащей заданную концентрацию мощности сигнала.

В [10, 11] для сигналов с частичным откликом предложен подход к синтезу оптимальных импульсов, при котором вместо вычисления полосы частот по тому или иному критерию используется спектральная маска для ограничения формы спектра в целом. Однако в силу особенностей постановки оптимизационной задачи отсутствует возможность учета спектральной маски в области $fT > 0,5$, что фактически делает невозможным учет области внеполосных излучений спектральной маски.

В [7] рассмотрены многокомпонентные (МК) сигналы – вариант сигналов с частичным откликом, отличающийся применением финитных импульсов. Для таких сигналов поставлена и решена задача поиска оптимальных импульсов с учетом всей спектральной маски, т. е. теоретически для любых значений fT . На примере маски, взятой из стандарта DVB-S2 [8, 9], показана эффективность такого подхода.

В [12–14] продемонстрирована эффективность применения сигналов FTN для стандарта DVB-S2. Недостатком является необходимость применения крайне вычислительно-сложных алгоритмов демодуляции, в то время как, например, в [7] используются вычислительно-эффективные подоптимальные алгоритмы демодуляции.

В качестве метрики, определяющей помехоустойчивость приема, в работах [4–7] рассмотрено минимальное евклидово расстояние. Однако при таком подходе заданная помехоустойчивость гарантируется только асимптотически, т. е. при очень низких значениях вероятности битовой ошибки (BER, Bit Error Rate) на выходе демодулятора. Очевидно, что при использовании помехоустойчивого кодирования такой подход оказывается несостоятельным, т. к. демодулятор в таких условиях обычно работает в условиях низких отношений сигнал/шум.

В данной статье предлагаются новые критерии для задачи синтеза оптимальных импульсов, обеспечивающие лучшую помехоустойчивость в условиях наличия помехоустойчивого кодирования. Показано, что при использовании получаемых для таких критериев импульсов удастся повысить спектральную эффективность системы DVB-S2 в целом, т. е. для всей сигнально-кодовой конструкции с учетом помехоустойчивого кодирования. При этом, как и в [7], в качестве ограничения спектра используется спектральная маска.

Постановка и решение оптимизационных задач синтеза импульса с учетом частотной маски

Многокомпонентные сигналы. В статье рассматриваются многокомпонентные сигналы [5, 6], т. е. сигналы с финитными

импульсами, длительность которых превосходит длительность T передачи одного символа канального алфавита в целое число раз L . При упоминании таких сигналов можно указывать конкретное число компонент, например, L -компонентные сигналы. В общем случае, с помощью МК-сигналов можно описывать многочастотные сигналы, например, сигналы OFDM и SEFDM [15–17]. Мы опишем одночастотные МК-сигналы. Удобство использования МК-сигналов заключается в том, что в каждой компоненте соседние импульсы не накладываются друг на друга и, таким образом, в каждой компоненте отсутствует МСИ. В целом, в сигнале имеется интерференция только между различными компонентами.

В системе DVB-S2 используются сигналы с амплитудно-фазовой модуляцией, построенные на основании нефинитных RRC-импульсов. Однако и такие сигналы можно представить как МК-сигналы. Для этого требуется усечь нефинитные RRC-импульсы по длительности по тому или иному критерию.

Можно показать [5], что форма энергетического спектра МК-сигналов определяется только формой импульса $a(t)$:

$$G(f) = \frac{LZ}{T} |F_a(Lf)|^2, \quad (1)$$

где $F_a(f)$ – спектр импульса $a(t)$; L – число компонент; Z – характеристика формы сигнального созвездия.

В [5] в качестве одной из возможных мер управляемой интерференции предложено значение максимального коэффициента парциальной корреляции Partial Correlation (PC):

$$\text{Max PC} = \max_{1 \leq k \leq L} \left\{ \left| \int (1/E_a) a(t)a(t-kT/L) dt \right| \right\}, \quad (2)$$

где E_a – энергия импульса $a(t)$.

Более часто используемой мерой уровня МСИ является свободное евклидово расстояние d_{free} [4]. Квадрат свободного евклидова расстояния вычисляется как минимум квадрата евклидова расстояния

между всеми возможными различными сигналами [7]:

$$d_{free}^2 = \min_n \{d_n^2\}. \quad (3)$$

Применению свободного евклидова расстояния в качестве меры МСИ свойственны два существенных недостатка. Во-первых, максимизация d_{free} гарантирует лучшую помехоустойчивость только асимптотически, т. е. при очень низких значениях BER. Это значит, что в системах с помехоустойчивым кодированием, где демодулятор обычно работает в условиях достаточно высоких значений вероятности ошибки на выходе, использование свободного евклидова расстояния не будет оптимально по критерию минимума энергетических потерь. Во-вторых, для вычисления d_{free} требуется проверка огромного количества возможных комбинаций сигналов в ходе решения оптимизационной задачи. Например, для МК-сигналов в случае использования сигнального созвездия QPSK число комбинаций равно $2 \cdot 3^{L-1}$, следовательно, сделать точный расчет d_{free} при длине импульса $L > 20$ практически невозможно.

Постановка оптимизационных задач для многокомпонентных сигналов. В [5, 6] были найдены оптимальные импульсы для МК-сигналов для разных критериев оптимальности и разных дополнительных ограничений. Во всех случаях не рассматривалась конкретная система передачи информации и не учитывалось наличие помехоустойчивого кодирования.

В данной статье мы предлагаем рассмотреть два критерия оптимальности: максимизацию свободного евклидова расстояния и минимизацию максимальной парциальной корреляции. В обоих случаях вместо ограничения точечных характеристик спектра мы предлагаем использовать ограничение в форме спектральной маски аналогично тому, как это было сделано в [7]. Будем использовать спектральную маску DVB-S2 для значения коэффициента скругления $\beta = 0,35$ [8]. Дополнительно мы предлагаем использовать идею, предло-

женную в [11], для достижения потенциальной емкости используемой маски. Согласно [11], уменьшение разности между нормированным спектром сигнала $G(f)$ и спектральной маской $Mask(f)$ позволяет увеличивать спектральную эффективность. Однако одновременно это приводит к энергетическим потерям. Мы будем контролировать разность спектра сигнала и спектральной маски путем введения соответствующего дополнительного ограничения в оптимизационных задачах, называемого «ограничение емкости».

Аналогично тому, как это делалось в [5, 6], мы снова вместо поиска оптимального импульса $a(t)$ будем выполнять поиск коэффициентов его разложения в усеченный ряд Фурье:

$$a(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{K-1} \left(c_k \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right) + s_k \sin\left(\frac{2\pi}{T}kt\right) \right), \quad (4)$$

где $(2K - 1)$ – количество коэффициентов разложения. Все характеристики МК-сигналов можно выразить через коэффициенты разложения c_k и s_k [7].

По-видимому, невозможно установить ограничение значений спектра сигнала для непрерывного диапазона частот, поэтому мы будем выбирать достаточно большое число N_f точек, расположенных равномерно на частотном интервале $0 \leq fT \leq 6$, в которых будем проверять выполнение ограничения спектральной маски:

$$G(f_i T) \leq Mask(\tau f_i T), \quad i = 0, 1, \dots, N_f - 1, \quad (5)$$

где $Mask(f)$ – непрерывная функция спектральной маски, описанная в стандарте DVB-S2.

Для повышения спектральной эффективности предлагается уменьшить длительность тактового интервала, определенную стандартом, т. е. перейти от значения T к значению τT , где $0 < \tau < 1$, и при этом уместить спектр сигналов в исходную спектральную маску. С точки зрения постановки и решения оптимизационной задачи удобно значение тактового интервала оставить равным T , поэтому

в качестве ограничений спектра необходимо использовать не исходную маску, а маску, сжатую в $1/\tau$ раз.

Ограничение емкости, связанное с разностью между маской и спектром сигнала, можно описать следующим образом:

$$\sum_{f_i} |Mask(\tau f_i T) - G(f_i T)| \leq P, \quad i=0, 1, \dots, N_f - 1, \quad (6)$$

где константа P может варьироваться при решении оптимизационной задачи.

Оценка помехоустойчивости полученных сигналов. Мы использовали следующие значения параметров оптимизационных задач: длительность импульса $L=8$ и сигнальное созвездие QPSK или $L=4$ и сигнальное созвездие 8PSK, количество коэффициентов разложения в усеченный ряд Фурье $K=30$, значение коэффициента сжатия спектральной маски $\tau=0,9$ (что соответствует выигрышу 10% в спектральной эффективности). Полученные нелинейные оптимизационные задачи с нелинейными ограничениями решены с использованием функции `fminimax` в MATLAB.

Проанализируем результаты решения для случая $L=8$ и сигнального созвездия QPSK. Всего было получено четыре разных импульса. Импульс 1 и импульс 2 являются решениями задачи максимизации свободного евклидова расстояния при наличии ограничения емкости и при отсутствии ограничения емкости соответственно. Для этих импульсов $d_{\text{free}}^2 = 2$, что потенциально (в случае малых значений BER) соответствует приему сигналов без энергетических потерь. Импульс 3 и импульс 4 являются решением задачи максимизации модуля коэффициентов парциальной корреляции при наличии ограничения емкости и при отсутствии ограничения емкости соответственно. Из-за ограничения емкости импульс 3 имеет значение MaxPC меньше аналогичного значения для импульса 4: MaxPC для импульсов 3 и 4 равны 0,15 и 0,06 соответственно. Заметим, что минимально возможное значение MaxPC равно нулю и соответствует сигналам с полным откликом. На рис. 1 показан сам импульс 4, его спектр, т.е. спектр МК-сигнала, и сжатая спектральная маска.

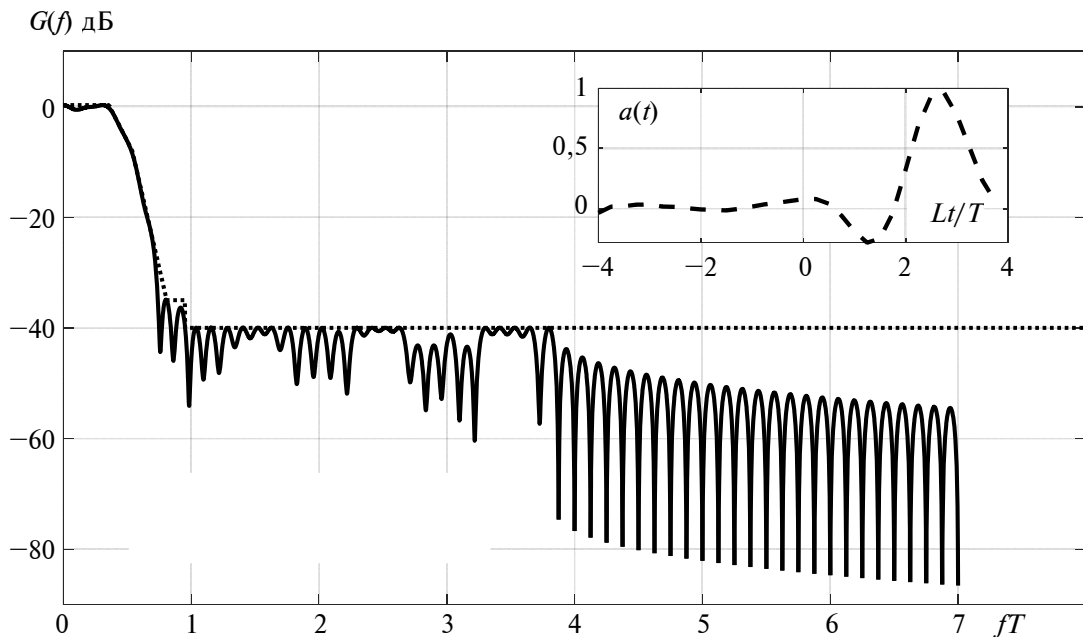


Рис. 1. Импульс 4, его спектр и сжатая спектральная маска
(—) — спектр сигнала; (.....) — спектральная маска

Fig. 1. Impulse 4, its spectrum and compressed spectral mask

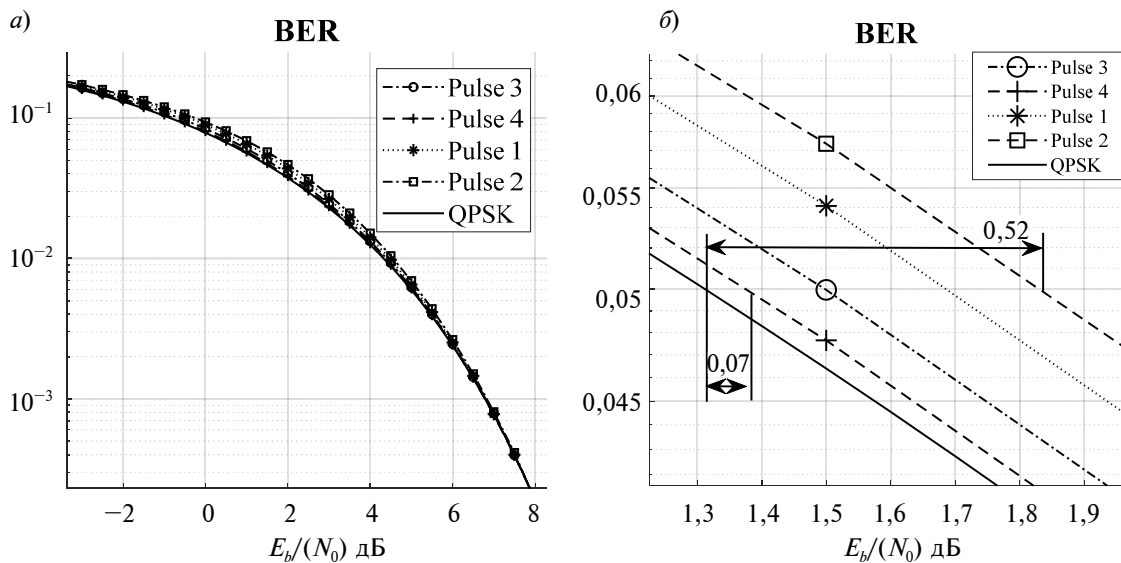


Рис. 2. Кривые помехоустойчивости для QPSK с полученными оптимальными импульсами

Fig. 2. Immunity curves for QPSK with optimal pulses obtained

Для оценки помехоустойчивости полученных импульсов использовано имитационное моделирование со следующими параметрами: сигнальное созвездие QPSK, канал с АБГШ, сигналы передавались кадрами по 64 800 бит без помехоустойчивого кодирования, для приема взят демодулятор на основе алгоритма ВСJR (можно также использовать подоптимальные версии [18–21]).

Как следует из анализа рис. 2 а, в первом приближении все импульсы имеют почти одинаковую помехоустойчивость, и все кривые близки к теоретической кривой для приема сигналов с QPSK. Однако из рис. 2 б видно, что в области низких значений E_b/N_0 импульс 4 является наилучшим, т. к. на уровне BER = 0,05 его энергетические потери составляют лишь около 0,07 дБ, в то время как, например, для импульса 2 они достигают 0,52 дБ. Аналогичные результаты были получены для случая $L = 4$ и сигнального созвездия 8PSK.

В стандарте DVB-S2 благодаря внешнему кодированию кодом BCH и внутреннему кодированию кодом LDPC демодулятор может работать в области очень низких отношений сигнал/шум:

от –6 до 4 дБ. Таким образом, применение импульса 4 обеспечит лучшие результаты.

Имитационная модель модифицированной системы DVB-S2

В системе DVB-S2 определен большой набор комбинаций типов сигнального созвездия (QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK), кодирования с исправлением ошибок (BCH, LDPC) и других опций для обеспечения функционирования с заданным качеством в различных областях применения от широкоэвещательных до интерактивных и профессиональных услуг. Для широкоэвещательных приложений обычно рекомендуется использовать сигнальные созвездия QPSK и 8PSK с длиной кодового слова LDPC кода, равной 64 800 бит. В качестве формирующих фильтров используются RRC-фильтры (т. е. с импульсной характеристикой вида RRC-импульса) с различными коэффициентами скругления. Мы предлагаем заменить RRC-фильтры на фильтры с импульсной характеристикой, полученной путем решения оптимизационной задачи (например, импульс 4) и добиться тем самым повышения спектральной эффективности с минимальными энергетическими потерями.

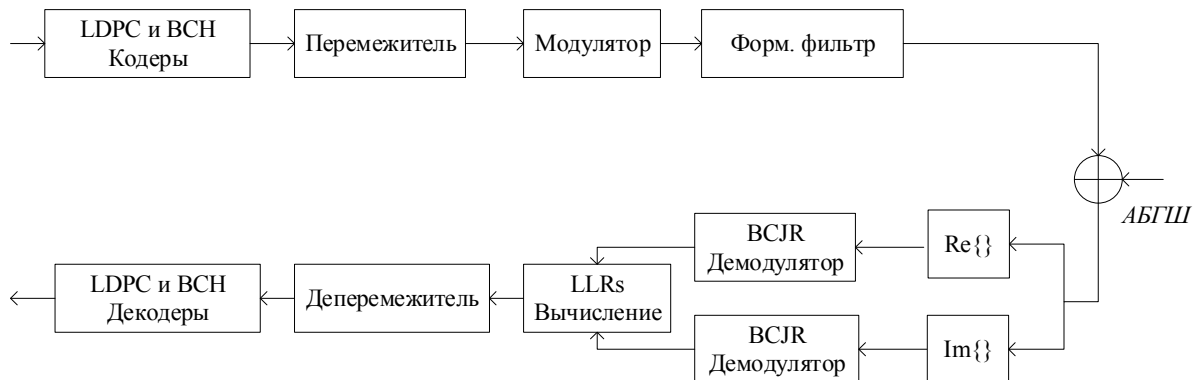


Рис. 3. Имитационная модель модифицированной системы DVB-S2 при использовании оптимальных импульсов

Fig. 3. Simulation model of a modified DVB-S2 system using optimal pulses

На рис. 3 представлена упрощенная имитационная модель модифицированной системы DVB-S2. В блоке формирующего фильтра RRC-импульсы заменяются конечными оптимальными импульсами. Демодулятор BCJR заменяет согласованный фильтр и демодулятор, которые используются в традиционной схеме. Мягкие решения о принятых битах, полученные на выходе демодулятора BCJR, отправляются в деинтерлейтер, а затем в декодеры LDPC и BCH.

Для оценки эффективности предлагаемого подхода результаты моделирования будут представлены в плоскости спектральной эффективности β_F и удельных энергетических затрат E_b/N_0 . Под значением E_b/N_0 мы понимаем отношение энергии E_b , приходящейся на передачу одного информационного бита, к односторонней спектральной плотности средней мощности аддитивного белого гауссовского шума N_0 , требуемое для получения значения пакетной ошибки $PER = 5 \times 10^{-4}$ (Packet Error Rate – PER). Спектральная эффективность β_F вычисляется следующим образом:

$$\beta_F = (R_{Code} R_{Mod}) / W, \quad (7)$$

где R_{Code} является суммарной кодовой скоростью кодов LDPC и BCH; R_{Mod} равно двум для QPSK и равно трем для 8PSK; занимаемая полоса W вычисляется как $(1 + \beta) / T$.

Обсуждение результатов

Результаты моделирования получены методом Монте-Карло в MATLAB для двух типов импульсов – RRC-импульса и оптимального импульса; сигнальное созвездие QPSK и 8PSK; кодовые скорости LDPC от 1/4 до 9/10. Для получения достоверных результатов расчет оценки вероятности ошибки в каждой точке кривой помехоустойчивости проводился до тех пор, пока не накопили тысячу ошибочных пакетов и тысячу ошибочных бит.

На рис. 4 каждая точка соответствует одной кодовой скорости LDPC. Слева направо для QPSK используются кодовые скорости [1/4 1/3 2/5 1/2 3/5 2/3 3/4 4/5 5/6 8/9 9/10]; для 8PSK – кодовые скорости [3/5 2/3 3/4 5/6 8/9 9/10]. При использовании оптимального импульса 4 спектральная эффективность увеличивается на 10 % для каждой кодовой скорости, энергетические потери по сравнению с RRC-импульсами составляют до 0,1 дБ для QPSK и до 0,25 дБ для 8PSK. Вместе это означает, что кривые для импульса 4 находятся выше и правее, чем кривые для RRC-импульса. Бóльший энергетический проигрыш для случая 8PSK, по-видимому, объясняется тем, что импульс, используемый для 8PSK, короче ($L = 4$), чем импульс, используемый для QPSK. То есть в случае 8PSK уровень МСИ оказывается больше.

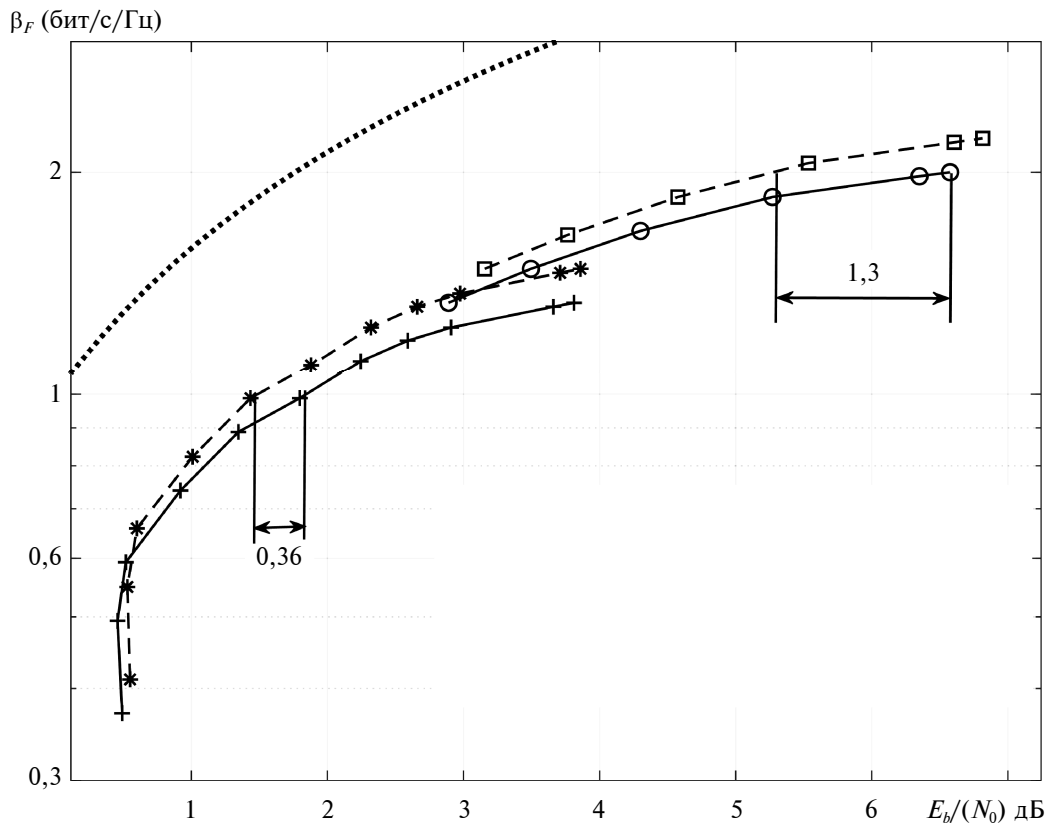


Рис. 4. Эффективность системы DVB-S2 при использовании RRC-импульса и оптимального финитного импульса

(.....) – граница Шеннона; (—+) – QPSK, RRC-импульс; (–*–) – QPSK, МК оптимальный импульс; (—o—) – 8PSK, RRC-импульс; (–□–) – 8PSK, МК оптимальный импульс

Fig. 4. DVB-S2 System Efficiency Using RRC Pulse and Optimal Compact Pulse

При сравнении результатов, полученных для оптимальных импульсов, с результатами, полученными для традиционных RRC-импульсов, видно, что, например, при $\beta_F = 1$ оптимальные импульсы обеспечивают выигрыш в удельных энергетических затратах 0,36 дБ, при $\beta_F = 2$ выигрыш составляет 1,3 дБ.

Выводы

Рассмотрены постановка и решение задачи поиска оптимальных финитных импульсов для повышения спектральной эффективности системы цифрового спутникового вещания DVB-S2. Показано, что лучшие результаты удается достигнуть при использовании в качестве критерия опти-

мальности минимизации максимального коэффициента парциальной корреляции. Традиционный подход, связанный с максимизацией свободного евклидова расстояния, показывает худшие результаты. В качестве дополнительного ограничения используется спектральная маска DVB-S2 и требование минимизации отклонения спектра сигналов от спектральной маски. Показано, что при использовании полученных импульсов в системе DVB-S2 можно снизить удельные энергетические затраты на величину до 1,3 дБ при сохранении спектральной эффективности, либо повысить спектральную эффективность на 10 % при энергетических потерях до 0,25 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Liveris D., Georghiades C.N.** Exploiting faster-than-Nyquist signaling // *IEEE Transactions on Communications*. 2003. Vol. 51. Iss. 9. Pp. 1502–1511.
2. **Fan J., Gou S.** Faster-than-Nyquist signaling: An overview // *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. Pp. 1925–1940 // URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7845669>
3. **Anderson J.B., Rusek F., Owall V.** Faster than Nyquist signaling // *Proc. of the IEEE*. 2013. Vol. 101. Iss. 8. Pp. 1817–1830.
4. **Said A., Anderson J.B.** Bandwidth-efficient coded modulation with optimized linear partial-response signals // *IEEE Trans. Inform. Theory*. 1998. Pp. 701–713, 1998.
5. **Гельгор А.Л., Горлов А.И., Попов Е.А.** Преодоление «барьера» Найквиста при использовании одночастотных неортогональных многокомпонентных сигналов // *Радиотехника*. 2015. № 1. С. 32–48.
6. **Гельгор А.Л., Горлов А.И., Нгуен Ван Фе.** Использование оптимальных финитных импульсов как способ наилучшего введения управляемой межсимвольной интерференции // *Радиотехника*. 2016. № 12. С. 112–120.
7. **Гельгор А.Л., Нгуен Тан Хоанг Фьюк.** Синтез спектрально-эффективных сигналов при наличии ограничения в виде спектральной маски // *Радиотехника*. 2018. № 12. С. 45–53.
8. **ETSI EN 302 307-1 v1.4.1 (2014-11):** Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2 // URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230701/01.04.01_60/en_30230701v010401p.pdf
9. **Draft ETSI EN 302 307-2 v1.1.1 (2014-10):** Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X) // URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230702/01.01.01_20/en_30230702v010101a.pdf
10. **Davidson T.N., Zhi-Quan Lu, Wong K.M.** Orthogonal pulse shape design via semidefinite programming // *IEEE Trans. on Signal Processing*. 2000. Vol. 48. Pp. 1433–1445.
11. **Shan Wen, Guanghui Liu.** Optimal precoding based spectrum compression for faster-than-Nyquist signaling // 2018 *IEEE Internat. Symp. on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*. 2018. Pp. 1–5.
12. **Kim P., Oh D.-G.** Receiver architecture for FTN signaling transmission in DVB-S2 // 2015 *IEEE 82nd Vehicular Technology Conf. (VTC2015-Fall)*. 2015. Pp. 1–5.
13. **Kwon H., Baek M.-S., Yun J., Lim H., Hur N.** Design and performance evaluation of DVB-S2 system with FTN signaling // *Proc. Int. Conf. Inf. Commun. Technol. Converg.* 2016. Pp. 1210–1212.
14. **Kim Y.J.D., Bajcsy J., Vargas D.** Faster-than-Nyquist broadcasting in Gaussian channels: achievable rate regions and coding // *Trans. Commun.* 2016. Vol. 64. No. 3. Pp. 1016–1030.
15. **Zavjalov S., Volvenko S., Makarov S.** A method for increasing the spectral and energy efficiency SEFDM signals // *IEEE Communications Letters*. 2016. Vol. 20. Iss. 12. Pp. 2382–2385.
16. **Zavjalov S., Volvenko S., Makarov S.** Duration of nonorthogonal multifrequency signals in the presence of controlled intersymbol interference // *Proc. 7th Int. Congr. Ultra Modern Telecommun. Control Syst. Workshops*. 2015. Pp. 49–52.
17. **Gelgor A., Gorlov A., Nguyen V.P.** Performance analysis of SEFDM with optimal subcarriers spectrum shapes // 2017 *IEEE Internat. Black Sea Conf. on Communications and Networking*. 2017. Pp. 1–5.
18. **Bahl L.R., et al.** Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol rate // *IEEE Trans. Inform. Theory*. 1974. Vol. IT-20. Pp. 284–287.
19. **Balachandran K., Anderson J.B.** Reduced complexity sequence detection for nonminimum phase intersymbol interference channels // *IEEE Trans. Inform. Theory*. 1997. Pp. 275–280.
20. **Haifeng Y., Ming-Wei Wu.** A modification of the BCJR algorithm over the flat fading channel and its application to turbo decoding // *Proc. Int. Conf. IEEE/CIC*. 2017 // URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8330429>
21. **Jorge A., Benjamin J.** A BCJR-based turbo equalizer for multicarrier time-varying fading channels // *Proc. Int. Conf. CISS (IEEE)*. 2017 // URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7926130>
22. **Nguyen V.P., Gelgor A., Gorlov A.** An intentional introduction of ISI combined with signal constellation size increase for extra gain in bandwidth efficiency // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. Springer, 2017. Pp. 644–652.

Статья поступила в редакцию 05.08.2019.

REFERENCES

1. **Liveris D., Georghiades C.N.** Exploiting faster-than-Nyquist signaling. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, Vol. 51, Iss. 9, Pp. 1502–1511.
2. **Fan J., Gou S.** Faster-than-Nyquist signaling: An overview. *IEEE Access*, 2017, Vol. 5, Pp. 1925–1940. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7845669>
3. **Anderson J.B., Rusek F., Owall V.** Faster than Nyquist signaling. *Proceedings of the IEEE*, 2013, Vol. 101, Iss. 8, Pp. 1817–1830.
4. **Said A., Anderson J.B.** Bandwidth-efficient coded modulation with optimized linear partial-response signals. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1998, Pp. 701–713.
5. **Gelgor A.L., Gorlov A.I., Popov E.A.** Exceeding the «nyquist barrier» by single-carrier nonorthogonal multicomponent signals. *Radiotekhnika*, 2015, No. 1, Pp. 32–48.
6. **Gelgor A.L., Gorlov A.I., Nguyen Van Fe.** Optimal finite pulses as the best way to introduce intersymbol interference. *Radiotekhnika*, 2016, No. 12, Pp. 112–120.
7. **Gelgor A.L., Nguyen Tan Khoang Fyok.** Синтез спектрально-эффективных сигналов при наличии ограничений в виде спектральной маски [New pulses for bandwidth-efficient modulation optimized for spectrum mask]. *Radiotekhnika*, 2018, No. 12, Pp. 45–53.
8. ETSI EN 302 307-1 v1.4.1 (2014-11): Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230701/01.04.01_60/en_30230701v010401p.pdf
9. Draft ETSI EN 302 307-2 v1.1.1 (2014-10): Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X). Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230702/01.01.01_20/en_30230702v010101a.pdf
10. **Davidson T.N., Zhi-Quan Lu, Wong K.M.** Orthogonal pulse shape design via semidefinite programming. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2000, Vol. 48, Pp. 1433–1445.
11. **Shan Wen, Guanghui Liu.** Optimal precoding based spectrum compression for faster-than-nyquist signaling. *2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 2018, Pp. 1–5.
12. **Kim P., Oh D.-G.** Receiver architecture for FTN signaling transmission in DVB-S2. *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference*, Pp. 1–5.
13. **Kwon H., Baek M.-S., Yun J., Lim H., Hur N.** Design and performance evaluation of DVB-S2 system with FTN signaling. *Proceedings International Conference Inf. Commun. Technol. Converg*, 2016, Pp. 1210–1212.
14. **Kim Y.J.D., Bajcsy J., Vargas D.** Faster-than-Nyquist broadcasting in Gaussian channels: achievable rate regions and coding. *Trans. Commun.*, 2016, Vol. 64, No. 3, Pp. 1016–1030.
15. **Zavjalov S., Volvenko S., Makarov S.** A method for increasing the spectral and energy efficiency SEFDM signals. *IEEE Communications Letters*, 2016, Vol. 20, Iss. 12, Pp. 2382–2385.
16. **Zavjalov S., Volvenko S., Makarov S.** Duration of nonorthogonal multifrequency signals in the presence of controlled intersymbol interference. *Proceedings 7th International Conference Ultra Modern Telecommun. Control Syst. Workshops*, 2015, Pp. 49–52.
17. **Gelgor A., Gorlov A., Nguyen V.P.** Performance analysis of SEFDM with optimal subcarriers spectrum shapes. *2017 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking*, 2017, Pp. 1–5.
18. **Bahl L.R., et al.** Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol rate. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1974, Vol. IT-20, Pp. 284–287.
19. **Balachandran K., Anderson J.B.** Reduced complexity sequence detection for nonminimum phase intersymbol interference channels. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1997, Pp. 275–280.
20. **Haifeng Y., Ming-Wei Wu.** A modification of the BCJR algorithm over the flat fading channel and its application to turbo decoding. *Proceedings International Conference IEEE/CIC*, 2017. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8330429>
21. **Jorge A., Benjamin J.** A BCJR-based turbo equalizer for multicarrier time-varying fading channels. *Proceedings International Conference CISS (IEEE)*, 2017. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7926130>

22. **Nguyen V.P., Gelgor A., Gorlov A.** An intentional introduction of ISI combined with signal constellation size increase for extra gain in bandwidth efficiency. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. Springer, 2017, Pp. 644–652.

Received 05.08.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

НГУЕН Тан Хоанг Фьюк
NGUYEN Tan Hoang Phuoc
E-mail: nguyentanhoangphuoc@gmail.com

ГЕЛЬГОР Александр Леонидович
GELGOR Aleksandr L.
E-mail: agelgor@spbstu.ru

DOI: 10.18721/JCSTCS.12304
УДК 621.39

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ FTN-СИГНАЛОВ И ПОЛЯРНОГО КОДИРОВАНИЯ

А.С. Овсянникова, С.В. Завьялов, С.В. Волвенко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для развития будущих поколений сетей связи требуется повышать как спектральную, так и энергетическую эффективность. Первого можно добиться за счет применения оптимальных сигналов faster than Nyquist (FTN), которые занимают меньшую полосу частот по сравнению с «классическими» сигналами и могут быть переданы с увеличенной символьной скоростью. Повышение энергетической эффективности связано с применением кодов с исправлением ошибок, в частности, полярных кодов и турбокодов. Использование перечисленных выше методик в совокупности позволит приблизиться к границе Шеннона. В данной статье выполнена оценка эффективности совместного применения оптимальных сигналов и полярных кодов, а также приведено сравнение полярных кодов и турбокодов с точки зрения приближения к границе Шеннона.

Ключевые слова: faster than Nyquist, полярное кодирование, турбокодирование, спектральная эффективность, энергетическая эффективность, предел Шеннона.

Ссылка при цитировании: Овсянникова А.С., Завьялов С.В., Волвенко С.В. Оценка эффективности совместного применения оптимальных FTN-сигналов и полярного кодирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 48–57. DOI: 10.18721/JCSTCS.12304

THE EFFICIENCY ESTIMATION OF THE JOINT APPLICATION OF OPTIMAL FTN SIGNALS AND POLAR CODING

A.S. Ovsyannikova, S.V. Zavjalov, S.V. Volvenko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

To develop future generations of networks it is necessary to improve both spectral and energy efficiency. The first one may be improved due to the application of optimal faster than Nyquist (FTN) signals which occupy less bandwidth comparing to «classic» signals and may be transmitted with increased symbol rate. Improvement of energy efficiency is associated with the application of error-correcting coding, in particular, polar coding and turbo coding. The using of the techniques mentioned above in total allows becoming closer to the Shannon limit. In this paper, the efficiency of the joint application of optimal signals and polar coding was estimated and polar codes and turbo codes were compared in terms of the distance to the Shannon limit.

Keywords: faster than Nyquist, polar coding, turbo coding, spectral efficiency, energy efficiency, Shannon limit.

Citation: Ovsyannikova A.S., Zavjalov S.V., Volvenko S.V. The efficiency estimation of the joint application of optimal FTN signals and polar coding. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 3, Pp. 48–57. DOI: 10.18721/JCSTCS.12304

Введение

Развитие многообещающих сетей широкополосного доступа пятого и следующих поколений связано с вопросами повышения спектральной и энергетической эффективности [1–6]. Использование «классических» сигналов не позволяет достичь значительных результатов в этой области. Намного более интересные результаты могут быть получены благодаря применению сигналов по технологии «быстрее чем Найквист» (faster than Nyquist – FTN), основной принцип которых – передача с увеличенной символьной скоростью R [7–9]. Однако увеличение символьной скорости обычно приводит к необходимости усложнения алгоритмов приема.

Разновидностью FTN-сигналов являются оптимальные сигналы увеличенной длительности [10, 11]. Форма импульса таких сигналов может быть получена в результате решения оптимизационной задачи с различными ограничениями [10–15]. Ограничения могут быть: скорость спада уровня внеполосных излучений, помехоустойчивость приема, пик-фактор случайной последовательности сигналов. При использовании ограничения на помехоустойчивость приема определенного уровня может быть реализован вариант приема сигналов с помощью алгоритма когерентного поэлементного приема [10, 11]. В таком случае скорость обработки информации повышается, упрощается структура и уменьшается стоимость конечного оборудования. В то же время помехоустойчивость приема близка к помехоустойчивости «классических» сигналов с прямоугольной формой импульса, передаваемых без интерференции во временной области [10, 11].

Кроме того, отметим, что использование оптимальных сигналов увеличенной длительности позволяет уменьшить занимаемую полосу частот ΔF , поэтому спектральная эффективность $R/\Delta F$ может быть значительно улучшена при минимальных энергетических затратах (не более 0,5 дБ), если символьная скорость R тоже велика.

Дополнительная возможность улучшения энергетической эффективности связа-

на с применением кодов с исправлением ошибок. Одним из вариантов таких кодов являются полярные коды, которые в последнее время набирают все большую популярность [16–18]. Данные коды рекомендованы для применения в сетях пятого и дальнейших поколений сетей связи [19].

Очевидно, что совместное применение оптимальных сигналов и кодов с исправлением ошибок должно обеспечить приближение к границе Шеннона. Граница Шеннона представляет собой зависимость теоретически достижимой энергетической эффективности E_b/N_0 (E_b – энергия бита, N_0 – спектральная плотность средней мощности шума) от спектральной эффективности $R/\Delta F$ в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) с емкостью C [20, 21]:

$$E/N_0 = (2^{R/\Delta F} - 1) / (R / \Delta F). \quad (1)$$

Цель данной статьи – оценка эффективности совместного применения полярных кодов и оптимальных сигналов, а также сравнение полярных кодов и турбокодов [22, 23], которые широко применяются в четвертом поколении сетей связи.

Оптимальные сигналы увеличенной длительности

Рассмотрим случайную последовательность $s(t)$ оптимальных сигналов длительностью $T_s = LT$, где T – длительность одного модуляционного символа с формой импульса $a(t)$, несущей частотой f_0 и амплитудой A_0 , передаваемых со скоростью $R = r/T$:

$$s(t) = A_0 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a(t - k/R) d^{(k)} \cos(2\pi f_0 t + \varphi^{(k)}), \quad (2)$$

где $d^{(k)}$ – k -й модуляционный символ, $\varphi^{(k)}$ – начальная фаза k -го символа. Будем использовать простейший вид модуляции ФМ2 ($d^{(k)} = \pm 1$, $\varphi^{(k)} = 0$).

Среди оптимизационных критериев выделяют критерий обеспечения заданной скорости спада уровня внеполосных излучений, которая определяется взвешивающей функцией $g(f) = f^{2n}$ ($n = 1, 2, \dots$). Формы импульсов $a(t)$, удовлетворяющие данному требованию, могут быть получены

путем минимизации оптимизационного функционала J [10–13]:

$$\arg \left\{ \min_{a(t)} (J) \right\},$$

$$J = \int_{-\infty}^{+\infty} g(f) \left| \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) \exp(-j2\pi ft) dt \right|^2 df. \quad (3)$$

При решении оптимизационной задачи также вводятся дополнительные ограничения, например, на помехоустойчивость приема, которая зависит от уровня межсимвольной интерференции. Данное ограничение учитывает символьную скорость передачи R и может быть численно выражено с помощью коэффициента взаимной корреляции K_0 :

$$K = \max_{r=1..(LRTL-1)} \left\{ \int_{r/R}^{LT} a(t) a(t-r/R) dt \right\} < K_0. \quad (4)$$

Для численного решения оптимизационной задачи удобно представить импульс в виде ограниченного ряда Фурье. Тогда оптимизационная задача минимизации функционала может быть преобразована в задачу поиска коэффициентов разложения $\{a_k\}_{k=1}^m$, минимизирующих функцию многих переменных следующего вида:

$$\min_{\{a_k\}_{k=1}^m} J(\{a_k\}_{k=1}^m),$$

$$J(\{a_k\}_{k=1}^m) = \frac{T_s}{2} \sum_{k=1}^m \left(\frac{2\pi}{T_s} k \right)^{2n} a_k^2. \quad (5)$$

Формы оптимальных импульсов длительностью $T_s = 12T, 14T, 16T$ и их энергетические спектры представлены на рис. 1.

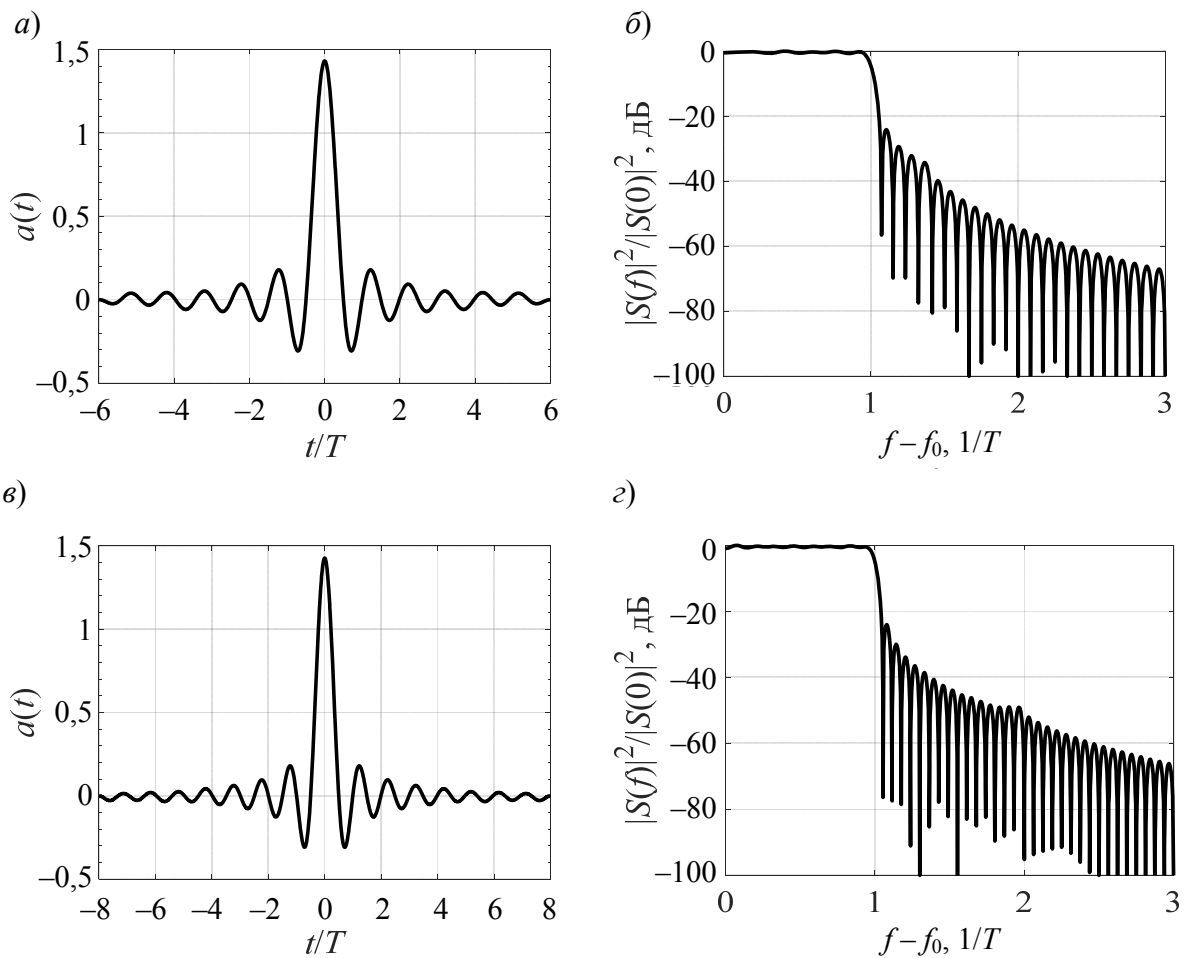


Рис. 1. Формы оптимальных импульсов и соответствующие им энергетические спектры:

$$n = 2, K_0 = 0,01, R = 2/T$$

Fig. 1. Optimal pulse shapes and corresponding energy spectra:

$$n = 2, K_0 = 0.01, R = 2/T$$

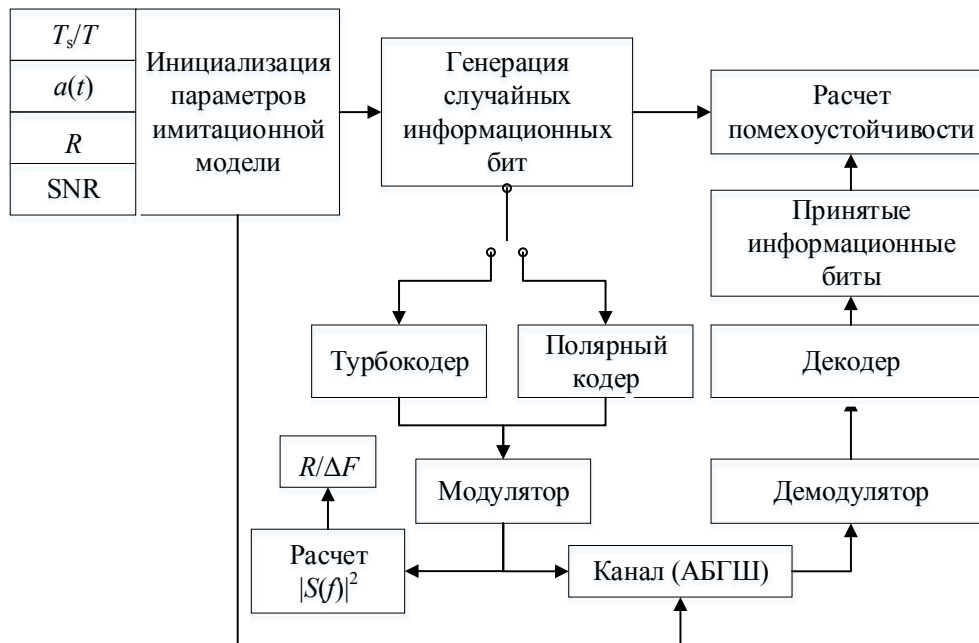


Рис. 2. Имитационная модель
Fig. 2. Simulation model

Имитационная модель

Блок-схема имитационной модели, разработанной в системе Matlab при использовании библиотеки LTE System Toolbox 5G Library, показана на рис. 2. Первым делом необходимо инициализировать параметры имитационной модели. Далее формируется случайная последовательность информационных битов и применяется либо полярное кодирование, либо турбокодирование. Кодовая скорость равна 1/2, размер входного блока составляет 128 битов, а размер кодового блока – 256 битов. Двойной бинарный циклический рекурсивный систематический сверточный код используется в турбокодере. Полярный код представлен следующими параметрами: количество битов CRC равно 24, количество битов проверки на четность равно нулю, входные биты подвергаются перемежению, выходные – не подвергаются*.

Последовательность кодовых битов поступает на вход модулятора оптимальных сигналов. После этого можно рассчитать энергетический спектр сформированного

сигнала, а также полосу занимаемых частот ΔF . В нашем случае будем определять ΔF по уровню энергетического спектра -30 дБ и -60 дБ. Спектральная эффективность $R/\Delta F$ рассчитывается для полученного значения ΔF . Затем сформированный сигнал проходит через блок, имитирующий канал с АБГШ.

Смесь сформированного сигнала и шума поступает на вход блока демодулятора. В данном блоке используется алгоритм когерентного поэлементного приема с мягкими решениями. Полученная последовательность мягких решений используется в блоке декодера соответствующего помехоустойчивого кода. Таким образом есть возможность найти энергетическую эффективность, представляющую собой отношение сигнал-шум E/N_0 , при котором достигается целевая вероятность ошибки $p_{\text{ош}} = 10^{-3}$.

В результате для заданного набора имитационных параметров будет получена одна точка в системе с координатами $\{E/N_0; R/\Delta F\}$. Помимо сравнения эффективности разных схем кодирования с исправлением ошибок также стоит рассмотреть эффективность как расстояние до кривой Шеннона. Обозначим минимальное расстояние между полученной точкой и множеством точек, описывающих кривую Шеннона, как d_{min} .

* GPP TS 38.212. 3rd Generation partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Multiplexing and channel coding (Release 15), v15.0.0, 2017-12.

Результаты

Результаты имитационного моделирования для оптимальных сигналов длительностью $T_s = 12T, 14T, 16T$ можно увидеть на

рис. 3 а). Отметим, что символическая скорость R была выбрана равной $1/T$ и $2/T$. Точки, соответствующие «классическим» ФМ2 сигналам, приведены для сравнения.

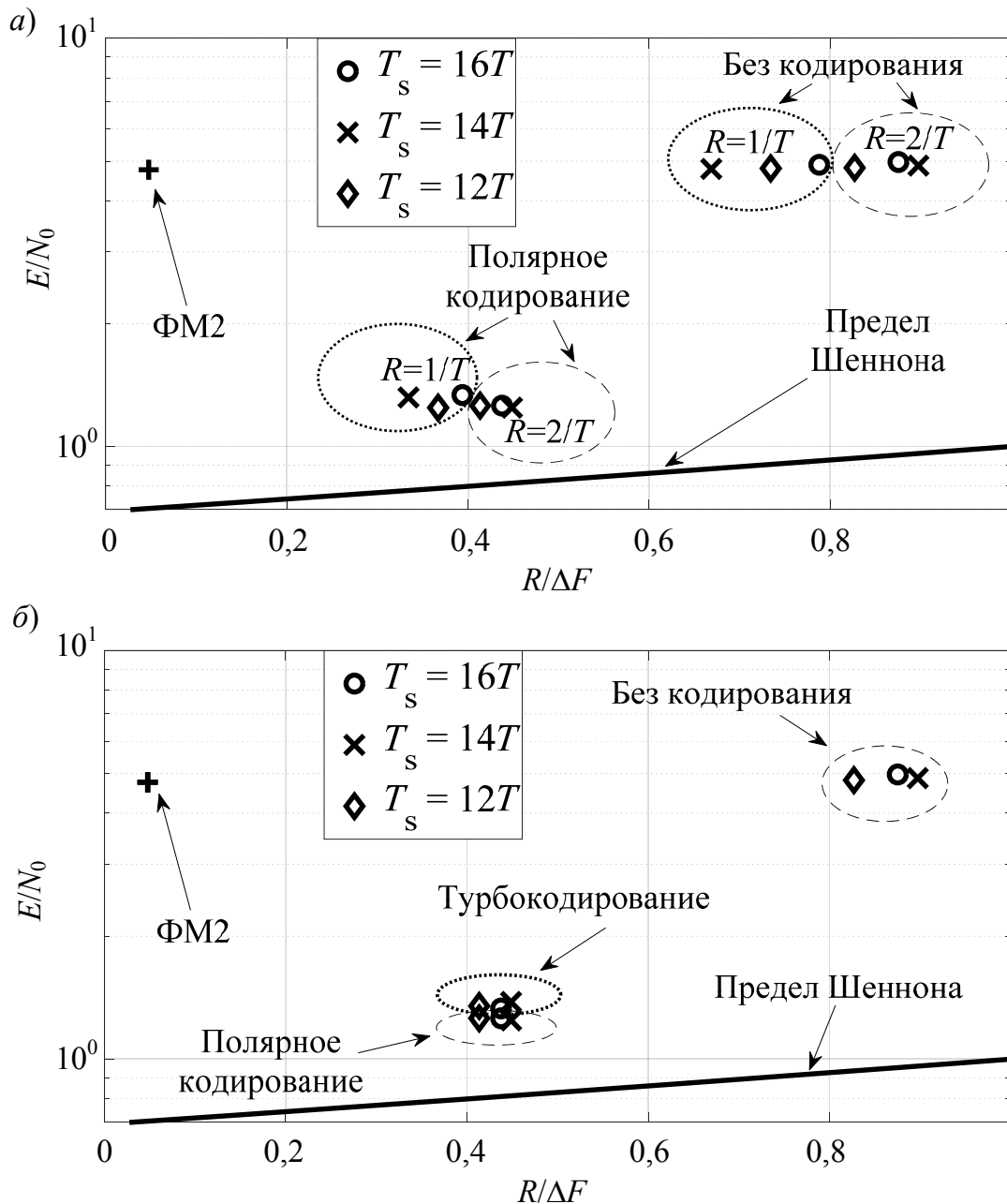


Рис. 3. Энергетическая и спектральная эффективность при использовании полярного кодирования и оптимальных сигналов с различной символической скоростью (а), сравнение полярных кодов и турбокодов при символической скорости $R = 2/T$ (б)

Fig. 3. Energy efficiency vs. spectral efficiency of optimal signals with different symbol rate in the case of polar coding (a), comparison between polar codes and turbo codes for symbol rate $R = 2/T$ (b)

Таблица 1

Уровень приближения к границе Шеннона
 (ΔF определяется по уровню -30 дБ энергетического спектра)

Table 1

The degree of approaching the Shannon limit
 (ΔF is determined for the level of -30 dB of energy spectrum)

T_s	d_{\min}					
	Турбокодирование		Полярное кодирование		Без кодирования	
	$R = 2/T$	$R = 1/T$	$R = 2/T$	$R = 1/T$	$R = 2/T$	$R = 1/T$
$16T$	0,50	0,52	0,43	0,52	3,31	3,34
$14T$	0,54	0,52	0,41	0,52	3,24	3,37
$12T$	0,52	0,51	0,44	0,44	3,26	3,33
«Классические» сигналы с ФМ2	3,80					

ΔF определяется по уровню -30 дБ энергетического спектра. Применение кодов с исправлением ошибок позволяет достичь выигрыша в E/N_0 при фиксированной вероятности ошибок, когда полоса занимаемых частот определяется по уровню -30 дБ, но приводит к ухудшению спектральной эффективности (рис. 3) из-за снижения скорости передачи полезной информации. Переход к увеличенной символической скорости позволяет получить выигрыш по спектральной эффективности в 19 %. Может показаться, что выигрыш в $R/\Delta F$ должен быть больше, но мы должны принять во внимание, что оптимальные сигналы были получены для фиксированных значений ограничений $n = 2$, $K_0 = 0,01$. Увеличение такого параметра оптимизационной задачи, как символическая скорость передачи, приведет к увеличению полосы частот ΔF , определяемой по заданному уровню энергетического спектра. В результате значение $R/\Delta F$ изменяется менее чем в два раза. Однако из-за фиксации параметра $K_0 = 0,01$ помехоустойчивость приема данных сигналов практически не меняется.

Сравнение полярных кодов и турбокодов (рис. 3 б и табл. 1) показывает преимущества полярных кодов. В среднем

применение полярных кодов позволяет приблизиться к границе Шеннона на 11 %. Выигрыш по сравнению с «классическими» сигналами с ФМ2 составляет около 86 %.

Отмеченные эффекты имеют место и в случае определения полосы занимаемых частот по уровню -60 дБ (рис. 4, табл. 2). Расстояние до границы Шеннона увеличивается в среднем на 5 %.

Выводы

Принимая все во внимание, мы можем подтвердить эффективность совместного применения оптимальных сигналов увеличенной длительности и кодов с исправлением ошибок с точки зрения приближения к границе Шеннона. Кроме того, полярное кодирование более эффективно по сравнению с турбокодами. Получение данного вывода позволяет предположить, что существует возможность преобразования выигрыша в спектральной эффективности в выигрыш в энергетической эффективности.

Дальнейшие исследования включают последующее увеличение символической скорости (до значений $10/T$) при усложнении алгоритмов приема с применением кодов с исправлением ошибок. На данный момент

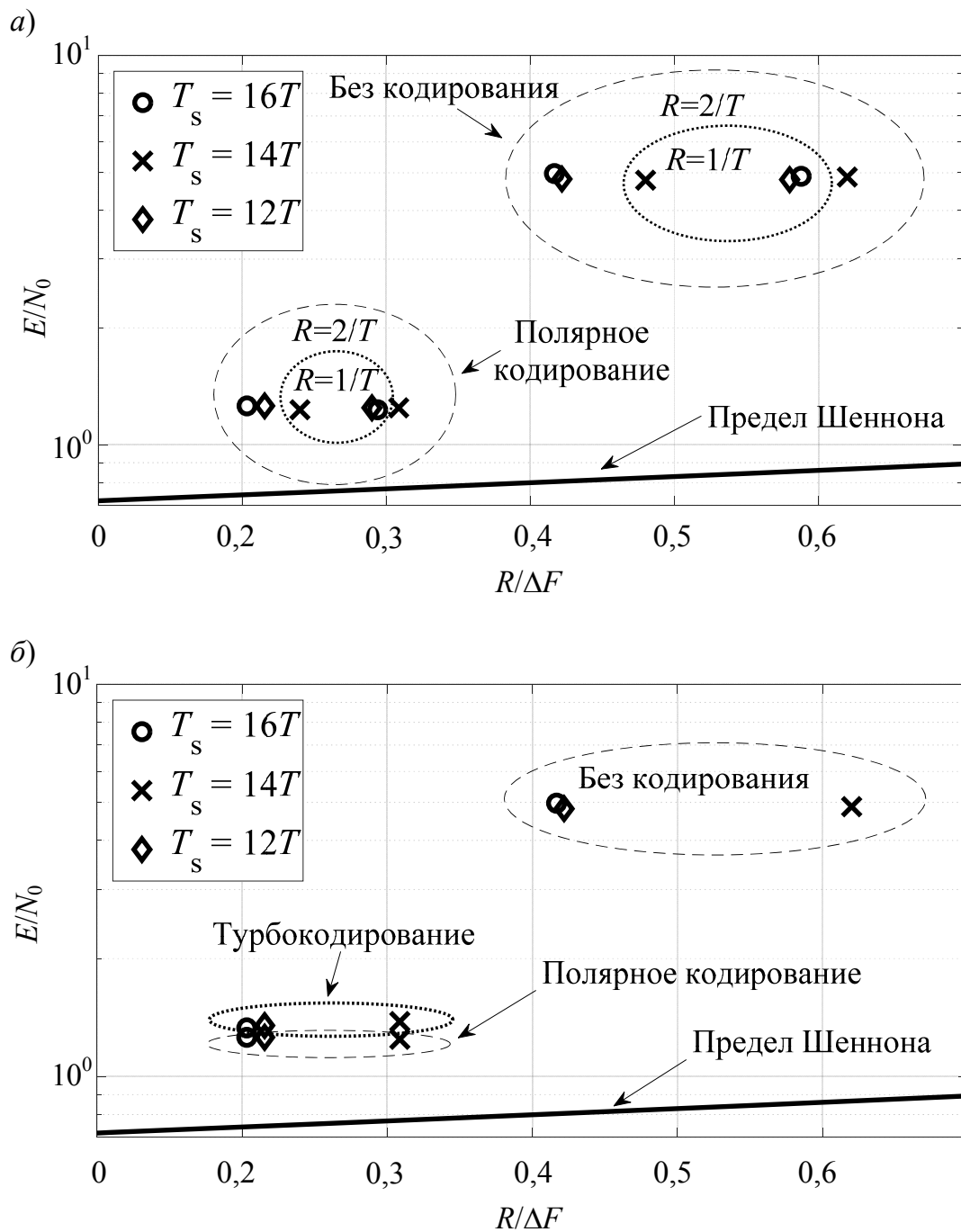


Рис. 4. Энергетическая и спектральная эффективность полярных кодов при различной символьной скорости (а); сравнение полярных кодов и турбокодов при символьной скорости $R = 2/T$ (б)

Fig. 4. Energy efficiency vs. spectral efficiency of optimal signals with different symbol rate in the case of polar coding (a), comparison between polar codes and turbo codes for symbol rate $R = 2/T$. ΔF is determined for the level of -60 dB of energy spectrum (b)

Таблица 2

Уровень приближения к границе Шеннона
(ΔF определяется по уровню -60 дБ энергетического спектра)

Table 2

The degree of approaching the Shannon limit
(ΔF is determined for the level of -60 dB of energy spectrum)

T_s	d_{\min}					
	Турбокодирование		Полярное кодирование		Без кодирования	
	$R = 2/T$	$R = 1/T$	$R = 2/T$	$R = 1/T$	$R = 2/T$	$R = 1/T$
16T	0,57	0,55	0,50	0,44	3,69	3,50
14T	0,58	0,54	0,45	0,46	3,46	3,52
12T	0,58	0,53	0,49	0,46	3,58	3,45

пока нет возможности получить оптимальные формы импульсов для символьной скорости R больше чем $2/T$. Следовательно, передача уже имеющихся сигналов с большей скоростью приведет к дополнительной интерференции, которая должна быть скомпенсирована на приеме за счет усложнения алгоритмов приема. Предварительные оценки показывают, что R может быть увеличена до $5/T$ с учетом применения кодов с исправлением ошибок и алгоритма приема «в целом» или алгоритма Витерби. Отметим, что в этом случае нет значительных энергетических потерь относительно помехоустойчивости, достигаемой без применения кодирования. Это может позволить увеличить спектральную эффектив-

ность более чем в два раза по сравнению с результатами, полученными в статье.

Другая область исследований включает в себя построение сигнально-кодовой конструкции, которая поможет максимизировать позитивный эффект от использования оптимальных сигналов и полярных кодов. Для этого потребуется использовать мягкие решения демодулятора оптимальных сигналов и изменить структуру полярного декодера.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук. Соглашение МК-1571.2019.8 № 075-15-2019-1155.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guo Fan S., Zhou X., Ren Y., Li G.Y., Chen X. Faster-than-Nyquist signaling: An overview // IEEE Access. 2017. Vol. 5. Pp. 1925–1940.
 2. Gorlov A., Gelgor A., Popov E. Improving energy efficiency of partial response signals by using coded modulation // 2015 IEEE Internat. Black Sea Conf. on Communications and Networking. Constanta. 2015. Pp. 58–62.
 3. Petrov V., et al. Achieving end-to-end reliability of mission-critical traffic in softwarized 5G networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2018. Vol. 36. No. 3. Pp. 485–501.
 4. Antonov E.O., Rashich A.V., Fadeev D.K., Tan N. Reduced complexity tone reservation peak-to-average power ratio reduction algorithm for

SEFDM signals // 2016 39th Internat. Conf. on Telecommunications and Signal Processing. Vienna, 2016. Pp. 445–448.
 5. Rashich A., Urvantsev A. Pulse-shaped multicarrier signals with nonorthogonal frequency spacing // 2018 IEEE Internat. Black Sea Conf. on Communications and Networking. Batumi, 2018. Pp. 1–5.
 6. Kholmov M., Fadeev D. The effectiveness of active constellation extension for PAPR reduction in SEFDM systems // 2018 IEEE Internat. Conf. on Electrical Engineering and Photonics. St. Petersburg, 2018. Pp. 116–118.
 7. Mazo J.E. Faster-than-Nyquist signaling // The Bell System Technical Journal. 1975. Vol. 54. No. 8. Pp. 1451–1462.

8. **Gattami A., Ringh E., Karlsson J.** Time localization and capacity of faster-than-Nyquist signaling // 2015 IEEE Global Communications Conf. 2015. Pp. 1–7.
9. **Zhou J., Li D., Wang X.** Generalized faster-than-Nyquist signaling // 2012 IEEE Internat. Symp. on Information Theory Proceedings. 2012. Pp. 1478–1482.
10. **Zavjalov S.V., Makarov S.B., Volvenko S.V.** Duration of nonorthogonal multifrequency signals in the presence of controlled intersymbol interference // 2015 7th Internat. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. Brno, 2015. Pp. 49–52.
11. **Zavjalov S.V., Volvenko S.V., Makarov S.B.** A method for increasing the spectral and energy efficiency SEFDM signals // IEEE Communications Letters. 2016. Vol. 20. Pp. 2382–2385.
12. **Waldman D.G., Makarov S.B.** Synthesis of spectral-effective modulation techniques for digital communication systems // Proc. of the 1st IEEE Internat. Conf. on Circuits and Systems for Communications. 2002. Pp. 432–435.
13. **Sadovaya Y., Gelgor A.** Synthesis of signals with a low-level of out-of-band emission and peak-to-average power ratio // 2018 IEEE Internat. Conf. on Electrical Engineering and Photonics. St. Petersburg, 2018. Pp. 103–106.
14. **Gelgor A., Gorlov A., Nguyen V.P.** Performance analysis of SEFDM with optimal subcarriers spectrum shapes // 2017 IEEE Internat. Black Sea Conf. on Communications and Networking. Istanbul, 2017. Pp. 1–5.
15. **Gelgor A., Gorlov A.** A performance of coded modulation based on optimal faster-than-Nyquist signals // 2017 IEEE Internat. Black Sea Conf. on Communications and Networking. Istanbul, 2017. Pp. 1–5.
16. **Arikan E.** Channel Polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2009. Vol. 55. No. 7. Pp. 3051–3073.
17. **Trifonov P.** Randomized chained polar subcodes // 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Workshops. Barcelona, 2018. Pp. 25–30.
18. **Trifonov P.** A score function for sequential decoding of polar codes // 2018 IEEE Internat. Symp. on Information Theory. Vail, CO, 2018. Pp. 1470–1474.
19. **Wang J., et al.** Spectral efficiency improvement with 5G technologies: Results from field tests // IEEE J. on Selected Areas in Communications. 2017. Vol. 35. No. 8. Pp. 1867–1875.
20. **Shannon C.E.** A mathematical theory of communication // The Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. No. 4. Pp. 623–656.
21. **Shannon C.E.** Probability of error for optimal codes in a Gaussian channel // The Bell System Technical Journal. 1959. Vol. 38. No. 3. Pp. 611–656.
22. **Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P.** Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1 // 1993 IEEE Internat. Conf. on Communications, Technical Program, Conf. Record. Geneva, 1993. Vol. 2. Pp. 1064–1070.
23. **Hui Jin, McEliece R.J.** Coding theorems for turbo code ensembles // IEEE Transactions on Information Theory. 2002. Vol. 48. No. 6. Pp. 1451–1461.

Статья поступила в редакцию 02.07.2019.

REFERENCES

1. **Guo Fan S., Zhou X., Ren Y., Li G.Y., Chen X.** Faster-than-Nyquist signaling: An overview. *IEEE Access*, 2017, Vol. 5, Pp. 1925–1940.
2. **Gorlov A., Gelgor A., Popov E.** Improving energy efficiency of partial response signals by using coded modulation. *2015 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking*, Constanta, 2015, Pp. 58–62.
3. **Petrov V., et al.** Achieving end-to-end reliability of mission-critical traffic in softwarized 5G networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, Vol. 36, No. 3, Pp. 485–501.
4. **Antonov E.O., Rashich A.V., Fadeev D.K., Tan N.** Reduced complexity tone reservation peak-to-average power ratio reduction algorithm for SEFDM signals. *2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*, Vienna, 2016. Pp. 445–448.
5. **Rashich A., Urvantsev A.** Pulse-shaped multicarrier signals with nonorthogonal frequency spacing. *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking*, Batumi, 2018, Pp. 1–5.
6. **Kholmov M., Fadeev D.** The effectiveness of active constellation extension for PAPR reduction in SEFDM systems. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics*, St. Petersburg, 2018, Pp. 116–118.

7. **Mazo J.E.** Faster-than-Nyquist signaling. *The Bell System Technical Journal*, 1975, Vol. 54, No. 8, Pp. 1451–1462.
8. **Gattami A., Rindh E., Karlsson J.** Time localization and capacity of faster-than-Nyquist signaling. *2015 IEEE Global Communications Conference*, 2015, Pp. 1–7.
9. **Zhou J., Li D., Wang X.** Generalized faster-than-Nyquist signaling. *Information Theory Proceedings, 2012 IEEE International Symposium on*, 2012, Pp. 1478–1482.
10. **Zavjalov S.V., Makarov S.B., Volvenko S.V.** Duration of nonorthogonal multifrequency signals in the presence of controlled intersymbol interference. *2015 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*, Brno, 2015, Pp. 49–52.
11. **Zavjalov S.V., Volvenko S.V., Makarov S.B.** A method for increasing the spectral and energy efficiency SEFDM signals. *IEEE Communications Letters*, 2016, Vol. 20, Pp. 2382–2385.
12. **Waldman D.G., Makarov S.B.** Synthesis of spectral-effective modulation techniques for digital communication systems. *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications*, 2002, Pp. 432–435.
13. **Sadovaya Y., Gelgor A.** Synthesis of signals with a low-level of out-of-band emission and peak-to-average power ratio. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics*, St. Petersburg, 2018, Pp. 103–106.
14. **Gelgor A., Gorlov A., Nguyen V.P.** Performance analysis of SEFDM with optimal subcarriers spectrum shapes. *2017 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking*, Istanbul, 2017, Pp. 1–5.
15. **Gelgor A., Gorlov A.** A performance of coded modulation based on optimal faster-than-Nyquist signals. *2017 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking*, Istanbul, 2017, Pp. 1–5.
16. **Arikan E.** Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, Vol. 55, No. 7, Pp. 3051–3073.
17. **Trifonov P.** Randomized chained polar subcodes. *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops*, Barcelona, 2018, Pp. 25–30.
18. **Trifonov P.** A score function for sequential decoding of polar codes. *2018 IEEE International Symposium on Information Theory*, Vail, CO, 2018, Pp. 1470–1474.
19. **Wang J., et al.** Spectral efficiency improvement with 5G technologies: results from field tests. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, Vol. 35, No. 8, Pp. 1867–1875.
20. **Shannon C.E.** A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, Vol. 27, No. 4, Pp. 623–656.
21. **Shannon C.E.** Probability of error for optimal codes in a Gaussian channel. *The Bell System Technical Journal*, 1959, Vol. 38, No. 3, Pp. 611–656.
22. **Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P.** Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1. *1993 IEEE International Conference on Communications, Technical Program, Conference Record*, Geneva, 1993, Vol. 2, Pp. 1064–1070.
23. **Hui Jin, McEliece R.J.** Coding theorems for turbo code ensembles. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, Vol. 48, No. 6, Pp. 1451–1461.


Received 02.07.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ОВСЯННИКОВА Анна Сергеевна
OVSYANNIKOVA Anna S.
 E-mail: anny-ov97@mail.ru

ЗАВЬЯЛОВ Сергей Викторович
ZAVJALOV Sergey V.
 E-mail: zavjalov_sv@spbstu.ru

ВОЛВЕНКО Сергей Валентинович
VOLVENKO Sergey V.
 E-mail: volk@cee.spbstu.ru



Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

DOI: 10.18721/JCSTCS.12305
УДК 621.391

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ D2D В СОТОВЫХ СЕТЯХ

А.Я. Омётов¹, К.А. Жиданов², С.В. Беззатеев², Е.А. Кучерявый¹

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Повсеместные исследования в области беспроводной связи предлагают огромный спектр технологических инструментов для потенциального натурального моделирования и интеграции. Одно из перспективных направлений в данной области – применение прямых соединений между мобильными узлами в географической близости (D2D). В статье проанализированы коммуникационные сценарии, возникающие в сетях связи пятого поколения с использованием прямых D2D соединений между пользовательскими мобильными узлами. Предложен метод кластеризации мобильных узлов в физической и социальной близости. Проведено численное исследование задержек, агрегированного трафика и вероятности разрыва сессии для выявления эффектов, связанных с применением прямых соединений в сетях пятого поколения 5G. Показаны преимущества по сравнению с использованием классических инфраструктурных решений в случаях неполного сотового покрытия.

Ключевые слова: D2D, 5G, кластеризация, имитационное моделирование, беспроводная связь.

Ссылка при цитировании: Омётов А.Я., Жиданов К.А., Беззатеев С.В., Кучерявый Е.А. Перспективы использования технологии D2D в сотовых сетях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 58–66. DOI: 10.18721/JCSTCS.12305

ON THE UTILIZATION OF D2D TECHNOLOGY IN CELLULAR NETWORKS

A.Ya. Ometov¹, K.A. Zhidanov², S.V. Bezzateev², Y.A. Koucheryavy¹

¹ National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russian Federation;

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

Today, wireless research offers an enormous range of technologies for potential prototyping and real-life integration. One of the promising directions in this area is the utilization of proximity-based direct connections between mobile nodes (D2D).

This paper studies proximity-based D2D communication scenarios related to beyond 5G cellular networks. A method of clustering mobile nodes in physical and social proximity is proposed. Numerical evaluation of delays, aggregated traffic, and the session interruption probability is provided aiming to identify the effects associated with the use of direct connections in 5G networks. The advantages of using classic infrastructure solutions in cases of incomplete cellular coverage are also provided.

Keywords: D2D, 5G, clustering, simulation campaign, wireless communications.

Citation: Ometov A.Ya., Zhidanov K.A., Bezzateev S.V., Koucheryavy Y.A. On the utilization of D2D technology in cellular networks. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 3, Pp. 58–66. DOI: 10.18721/JCSTCS.12305

Введение

Использование персональных мобильных устройств – неотъемлемая часть жизни из-за существования сравнительно надежной беспроводной сотовой связи. На сегодняшний день более 60 % населения России пользуются мобильным Интернетом. Согласно статистике, пользователи мобильного телефона активно взаимодействуют с устройством более трех часов в день, что составляет почти сутки в неделю [1].

Возрастающий объем мобильного трафика вызывает дополнительную нагрузку на современные широкополосные беспроводные системы. В частности, большая часть трафика состоит из созданных пользователями видео и изображений, которые распространяются в социальных сетях [2]. Чтобы эффективно справиться с растущей нагрузкой, современные сотовые технологии активно развиваются в направлении к своему пятому поколению (5G), охватывая более высокие несущие частоты, многоантенные системы и сверхплотные гетерогенные сети. Ожидается, что все эти и другие технологические инновации резко увеличат доступную пропускную способность сети в тысячу раз к 2020 году [3]. С другой стороны, прогресс в развитии мобильных устройств с более мощными вычислительными и коммуникационными возможностями позволяет ориентироваться на новые архитектуры, где интеллектуальное оборудование становится более вовлеченным в принятие решений о динамическом выборе технологии и типе связи наравне с сетевой инфраструктурой.

Ожидается, что более умные мобильные устройства, оснащенные большими интеллектуальными возможностями, различными радиомодулями и расширенными возможностями кэширования и противодействия помехам, будут играть более важную роль в управлении будущими сетями 5G. В частности, предполагается, что прямая связь между устройствами, находящимися в географической близости (D2D), в конечном итоге поможет эффективнее передавать пользовательскую информацию между соседствующими устройствами. Таким образом, контроль за соединениями может сместиться от централизованного центра к более распределенным системам связи.

Действительно, в то время как в унаследованных от телефонных сетей общего пользования системах все пользователи связываются исключительно через сетевую инфраструктуру, в эпоху современных коммуникаций пользователи часто обмениваются данными по беспроводной связи, в том числе и напрямую, минуя инфраструктуру.

Однако установка связи с учетом потребностей пользователей сильно отличается от централизованного управления тем, что она тесно связана с «социальным» поведением человека, а также может быть охарактеризована соответствующими потребностями пользователей. Исторически форумы и чаты были первой формой социальных сетей, основанных на стремлении людей свободно общаться. Позже они были дополнены множеством файлообменных систем, что привело к парадигме современных социальных сетей [4].

Сейчас новые возможности, такие как ориентированность на устройства (улучшенная локализация посредством GPS и сотовой связи), высокая осведомленность о контексте (с использованием различных сенсоров), множество технологий ближнего радиуса действия и повсеместный доступ к сети Интернет, позволили пользователям получать доступ к привычному контенту и без привязки к персональному стационарному компьютеру. В то же время человеку свойственно общаться в узком социальном кругу. Фактические взаимодействия людей и социальные отношения остаются в высокой степени локальными, организованными вокруг общего географического пространства. Однако социальные сети смещают чашу весов, перемещая своих пользователей из физических пространств в виртуальные. По сути, новые пространства состоят из людей, организованных в соответствии с определенными устойчивыми социальными группами, их конкретными моделями взаимодействия, которые демонстрируют социальные отношения.

Несмотря на то, что появление классических централизованных сотовых сетей оказало влияние на производительность и возможность подключения людей, также оно привнесло ряд ограничений и проблем для реальных социальных отношений. Основным препятствием для таких виртуальных сообществ и онлайн контактов является то, что люди не осведомлены о богатых социальных возможностях, доступных для них в реальном окружающем мире (например, новые возможности для знакомства, бизнеса и развлечений, коллективных игр, контекстных медиаданных). Кроме того, исследования показали, что удаленная связь препятствует живому общению «лицом к лицу» – самой традиционной и естественной форме социализации.

Таким образом, будущая связь 5G должна предоставлять эффективные средства для объединения физических и виртуальных миров, позволяя пользователям взаимодействовать с рекомендованными

людьми (например, людьми со схожими интересами) в географической близости, а также фактически участвовать в совместной деятельности в соответствии с личными предпочтениями. Это может не только повысить общий уровень взаимодействия между людьми, но и помочь с выявлением важных потенциальных контактов людей и их навыков или создать лучшее чувство общности в среде городов, где одиночество становится все более серьезной проблемой для современного человека.

В свете сказанного выше мы предполагаем, что прямая D2D связь на основе географической близости может решить проблемы социального характера в реальном времени, а также позволит обеспечить более гибкое управление сетями в городской среде.

В статье рассмотрены основные сценарии использования связи D2D. Предложена модель кластеризации пользователей на основании социальной и пространственной близости. В частности, проведено численное исследование работы классической инфраструктурной и D2D-расширенной сетей с точки зрения пропускной способности, задержки и вероятности прерывания сессии.

Основные сценарии использования технологии

Статистика использования современных беспроводных сетей показывает, что большая часть трафика приходится на загрузку популярного контента, такого как видео и мобильные приложения [5]. Поэтому пользователи в географической близости могут получить возможность загрузки популярных данных локально и непосредственно от своих «соседей», чтобы уменьшить общую нагрузку на инфраструктурные сети, что является преимуществом для сотовых операторов [6]. Также это выгодно для пользователей за счет применения более энергоэффективных технологий ближнего радиуса действия [7]. Тем не менее, технология D2D, хотя и изначально разрабатываемая для повышения агрегированной пропускной способности беспроводной связи за счет разгрузки сотового

трафика на нелицензируемый диапазон, превращается в одно из самых многообещающих нововведений на пути к сетям мобильной связи 5G, предоставляя новые сервисы и услуги. Далее приведем некоторые из наиболее популярных.

Обнаружение устройств/услуг в географической близости. D2D может содействовать в распространении данных идентификации пользователя для упрощения дальнейшего взаимодействия. D2D также может помочь в поиске новых социальных связей, т. е. людей, разделяющих схожие интересы, особенно при наличии соответствующих социальных рекомендаций. Эта категория в основном фокусируется на улучшении последующего взаимодействия с пользователем в различных сценариях и предоставляет средства для поиска ближайших партнеров D2D.

Совместное создание и распространение контента. Как следует из названия, D2D дает возможность пользователям загружать и обмениваться своим или уже скачанным контентом. Такие данные могут быть, например, созданы пользователем (фотографии, видео и т. д.) и могут относиться к определенному событию, на котором присутствуют другие пользователи.

Профессиональное и специальное применение. Данные приложения связаны с использованием технологии D2D в профессиональных целях или для нужд бизнеса. Например, это может потребоваться для быстрого и упрощенного установления соединения (передачи визиток, презентаций, и т. п.), а также для более критичных требований к безопасности, конфиденциальности и доверия. С точки зрения специального назначения, D2D может использоваться в случае отказа сотовой сети (когда сотовая инфраструктура становится частично или полностью недоступной), а устройства со специальным функционалом могут продолжать связь в случае чрезвычайной ситуации, используя связь D2D.

Проактивное взаимодействие. Важно отметить, что D2D также может использоваться для заблаговременного уведомления

пользователя об определенных событиях (близлежащие коммерческие предложения в торговых центрах, реклама на основе местоположения и т. д.) или даже осуществлять торговлю и обмен данными.

Локализованные контакты и медиа. D2D может помочь людям совместно участвовать в коллективных действиях и контактировать друг с другом с целью социализации и досуга. Эта категория также включает в себя множество приложений, работающих на основе определения местоположения, и, в первую очередь, предназначена для распространения контента во время мероприятий. Например, мгновенные повторы на спортивном матче могут быть переданы всем заинтересованным пользователям, находящимся в определенном радиусе.

Игровая индустрия. D2D имеет огромный потенциал для поддержки игровых сценариев с участием как находящихся поблизости людей, так и интерактивных объектов. Такие игры являются привлекательным занятием для людей, без необходимости явных социальных взаимодействий или идентификации других игроков. Вполне вероятно, что это приложение станет более распространенным при интеграции D2D.

Исходя из вышесказанного, технология D2D является сильным дополнением к уже существующим классическим инфраструктурным беспроводным сетям.

Модель системы

Рассмотрим набор мобильных узлов, каждый из которых передает данные на сервер в сети сотового оператора. На практике рассматриваемый смартфон может иметь несколько радиointерфейсов ближнего (например, BLE, WiFi) и дальнего (LTE) радиусов действия. Кроме того, предполагается, что этот узел может напрямую подключаться к другому узлу по D2D-каналу. Предполагается, что существует инфраструктурная сотовая сеть со всеми подключенными к ней узлами, некоторые из которых могут временно терять

соединение по различным причинам (слабое покрытие, нахождение в лифтах, подвалах и т. п.). Подробный обзор рассматриваемой архитектуры можно найти в [8]. Данные могут пересылаться по сотовой связи в сеть оператора и далее в соответствующее облако. В случае ненадежного сотового соединения данные могут передаваться другими ближайшими пользователями (реле), тогда как сами пользователи могут перемещаться в соответствии с определенной моделью мобильности.

Под коалицией будем понимать набор узлов, находящихся в географической близости, связанных между собой с использованием технологии ближнего радиуса действия. В зависимости от местоположения такой коалиции может быть рассмотрено несколько случаев, представляющих интерес. Коалиция может полностью находиться под покрытием сотовой сети, и для защиты данных, передаваемых по сотовой сети, могут использоваться традиционные процедуры защиты информации, т. е. в первом случае предполагается, что как процедуры безопасности, так и данные используют сотовый канал для распространения, в то время как во втором случае сотовая сеть отвечает только за процедуры безопасности (обмен данными осуществляется напрямую между смартфонами). В третьем случае как процедуры безопасности, так и потоки данных используют прямую связь между узлами.

Хотя предложенная структура предназначена для охвата всех обсуждаемых вариантов использования, последний из трех представляет особый интерес. Предоставление ближайшим пользователям возможности не только напрямую общаться в защищенном режиме, но и производить обмен данными при прерывистой связи с инфраструктурой, является одной из основных целей данного исследования. Как последний возможный случай, коалиция может оказаться полностью вне зоны действия сотовой сети. Однако поскольку в соответствии с концепцией D2D в сетях 5G управление инициализацией, работой и разрывом D2D соединений координирует-

ся сотовой инфраструктурой, последний случай не рассматривается в данной статье.

В рамках предлагаемой архитектуры и указанных выше сценариев, коалиции могут быть сформированы на основании двух параметров, связанных с «близостью». Во-первых, существует географическая близость мобильных узлов, что влияет на возможность формирования коалиций с учетом качества беспроводного канала. Под другим типом подразумевается «социальная близость» пользователей. Мобильное устройство может знать о своих предыдущих соединениях с мобильными пользователями, или, в качестве альтернативы, эта информация может быть получена из контактов, уже сохраненных на смартфоне. Далее мы покажем, как эта информация может эффективно применяться для повышения производительности системы с использованием алгоритма безопасности, представленного в работе [9], где впервые приведен метод социальной кластеризации пользователей с употреблением как пространственных, так и социальных метрик близости. Вкратце, формирование начальной коалиции может производиться при наличии соединения с сотовой сетью минимум у одного из узлов. Важно отметить, что при наличии такого соединения за этот процесс отвечает сама сотовая сеть, в то время как при полном отсутствии такого соединения D2D связь полностью организовывается в соответствии с протоколами децентрализованных сетей.

Под набором коалиций определим множество C , такое, что $C = \{C_1, \dots, C_k\}$, то есть это множество взаимно непересекающихся коалиций $C_i \subset N$ так, что $C_i \cap C_j = \emptyset$ для любого $i \neq j$. В случае, если в коалиции присутствуют все пользователи из N , $\bigcup_{i=1}^k C_i = N$, то обозначим N разделом Π от всего набора коалиций. Все пользователи имеют возможность вступить и покинуть коалиции.

Определим предпочтение \triangleright для сравнения двух $S \subseteq N$ ($L = \{L_1, \dots, L_N\}$) и ($Q = \{Q_1, \dots, Q_q\}$) для проверки принадлежности одинаковых узлов к двум набо-

рам, т. е. если L разделов в S предпочтительнее, чем Q разделов в S , то $L \succ Q$. Используемый порядок предпочтений основан на двух правилах.

1. Можно объединить любые наборы непересекающихся коалиций $C = \{C_1, \dots, C_K\}$ тогда и только тогда, когда из

$$\{U_{i=1}^k C_i\} \succ \{C_1, \dots, C_K\} \quad \text{следует, что}$$

$$\{C_1, \dots, C_K\} \rightarrow \{U_{i=1}^k C_i\}.$$

2. Можно разделить любую коалицию $\{U_{i=1}^k C_i\}$, если из $\{C_1, \dots, C_K\} \succ \{U_{i=1}^k C_i\}$ следует, что

$$\{U_{i=1}^k C_i\} \rightarrow \{C_1, \dots, C_K\}.$$

Важно, что предлагаемая структура учитывает влияние мобильности пользователей. Классические методы теории оптимизации рассматривают момент работы сети t , а затем нацелены на разработку практических алгоритмов для оптимизированной работы системы по отношению к определенной метрике. Такой подход не может напрямую оценивать мобильность пользователей, поскольку движение может вызвать значительные отклонения от оптимального решения в другое время $t + \Delta t$.

Численные результаты

Для оценки эффективности предлагаемого подхода произведено имитационное моделирование в среде Python. Рассматривалась сота 3GPP LTE с радиусом 100 м, где мобильные узлы случайно распределены по равномерному закону, а покрытие сотовой связи доступно лишь в 70 % пространства. Для моделирования мобильности была выбрана модель Леви с α равным 1,5 и скоростью пользователя, варьирующейся в диапазоне $[0,2; 2,0]$ м/с. Параметр α позволяет настроить форму распределений по размеру шага [10]. Иными словами, рассматривается 3GPP сценарий, который стандартизирован в разделе 5.2.4.3 спецификации 3GPP TS 36.304. Модель трафика соответствует передаче видео с невысокой интенсивностью входного потока и размером пакета 100 МБ. Максимальная дальность соеди-

нения D2D взята равной 30 м, а время установления соответствующего соединения – равным 1 с.

Система анализируется с точки зрения времени загрузки мультимедийного контента, а также максимального трафика узла, когда видео загружается по любому из каналов. Последней характеристикой взята вероятность прерывания сеанса связи между любыми двумя узлами. Таким образом, производится сравнительный анализ систем, работающих в инфраструктурном и D2D-расширенных режимах.

Рассмотрим характер суммарного трафика в системе в зависимости от количества пользователей (рис. 1 а) и скорости движения (рис. 1 б). Важно отметить, что предложенная система кластеризации демонстрирует значительное превосходство по сравнению с традиционным инфраструктурным решением. Это обусловлено возможностью подключения к коалиции пользователей, которые находятся также вне сотового покрытия. В этом случае дополнительный трафик генерируется в обмен на дополнительные задержки установления D2D соединений, что показано на рис. 2.

Исходя из рис. 2, мы можем наблюдать, что задержка линейно уменьшается с увеличением скорости узла, а также с увеличением количества пользователей. Это обусловлено тем, что увеличение скорости пользователя приводит к увеличению числа потенциальных D2D контактов между ними. Таким образом, пользователи могут загружать контент по D2D с более высокой скоростью передачи данных. Результаты исследования с точки зрения задержки можно сравнить с графиком 5 из работы [11]. Отметим, что в нашем сценарии используются системы с высоким входным потоком, таким образом можно обратиться к правой части графика, где входной поток соответствует 40 мс и более. Значения, приведенные в данной статье, подтверждают полученные результаты с точностью до единиц миллисекунд.

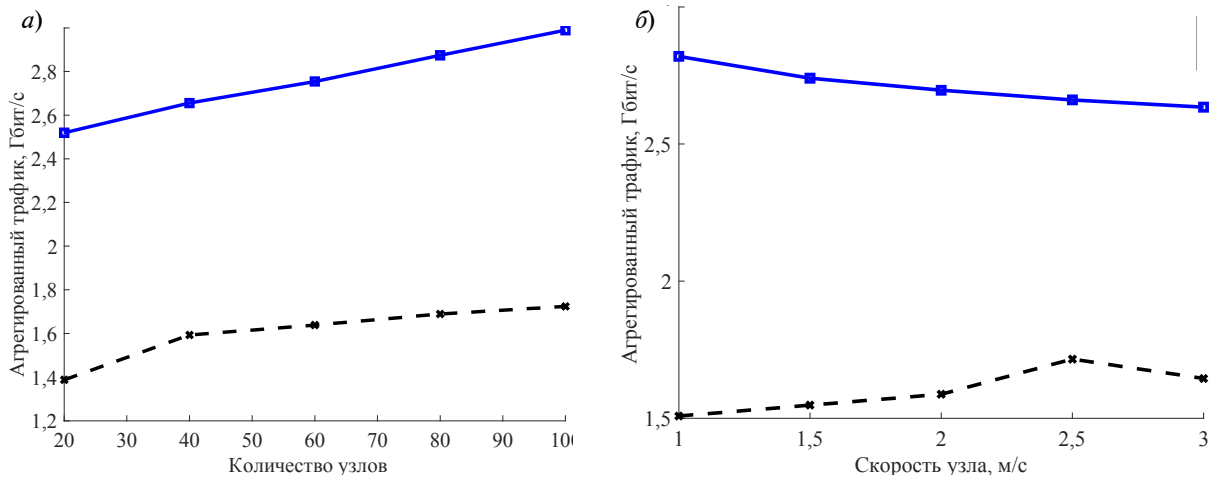


Рис. 1. Анализ агрегированного трафика: *a* – зафиксирована скорость 1,5 м/с; *б* – зафиксировано 20 узлов

(—*) — передача через сотовую сеть; (—■) — передача с использованием D2D

Fig. 1. Aggregated traffic analysis: *a* – fixed user speed 1.5 m/s; *b* – fixed number of users is set to 20

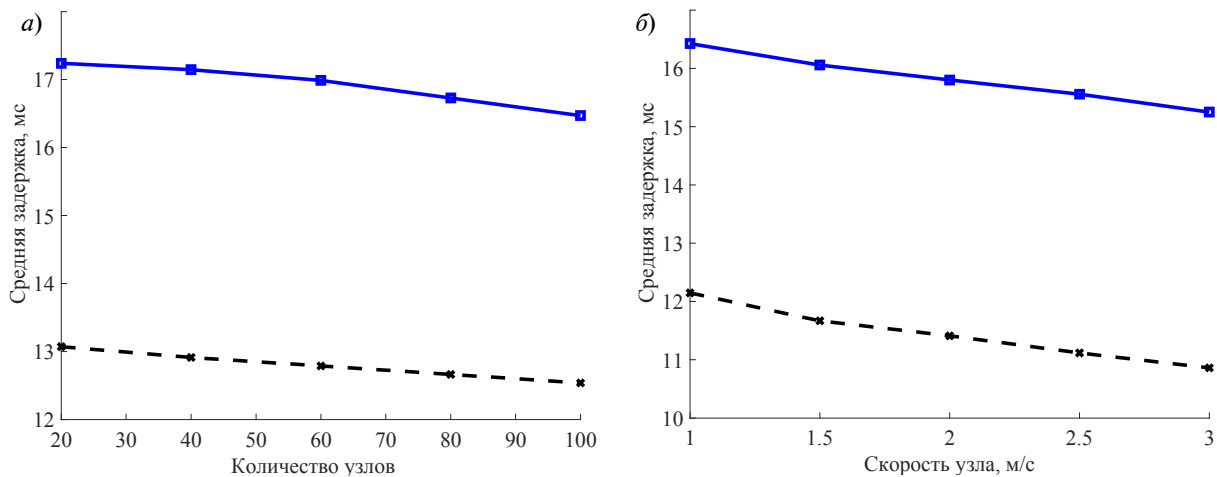


Рис. 2. Анализ средней задержки: *a* – зафиксирована скорость 1,5 м/с; *б* – зафиксировано 20 узлов

(—*) — передача через сотовую сеть; (—■) — передача с использованием D2D

Fig. 2. Average delay analysis: *a* – fixed user speed 1.5 m/s; *b* – fixed number of users is set to 20

Наконец, вероятность разрыва сеанса связи приведена на рис. 3. Как видно из графиков, предлагаемый подход работает более эффективно по сравнению с обычным инфраструктурным решением. Объяснение снова заключается в том, что предлагаемая структура способна гарантировать возможность соединения, даже если пользователи не находятся в зоне покрытия сети. Как следствие, узлы получают более длительные сеансы связи

за счет дополнительной задержки: повышают вероятность получения желаемого контента. Сравнение результатов пропускной способности и вероятности разрыва сессии с существующими работами является проблематичным в силу специфики сценария (интеллектуальная кластеризация пользователей с использованием прямых соединений и сотового канала): из-за отсутствия в современной литературе соответствующего анализа.

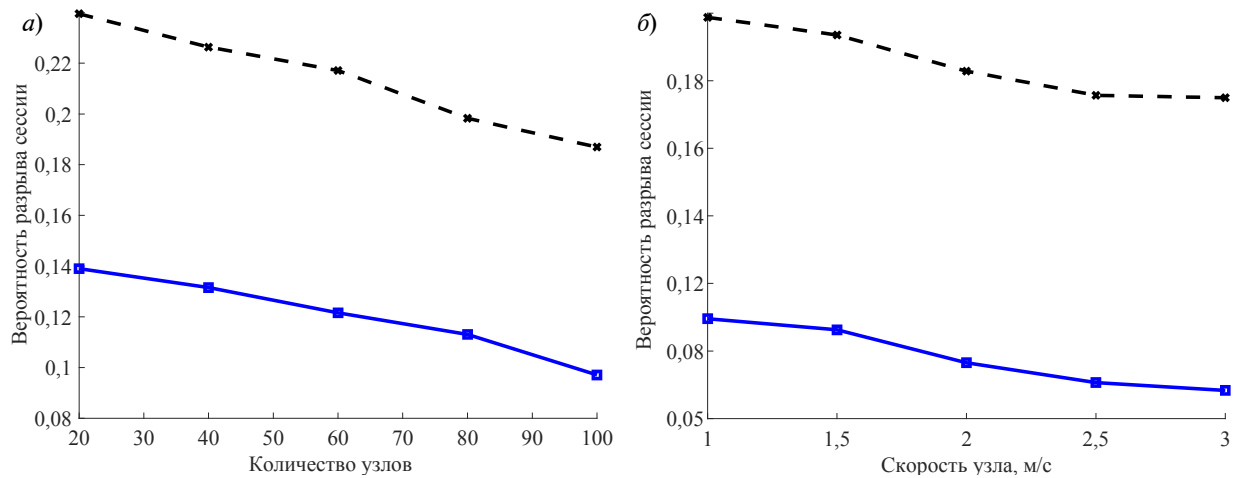


Рис. 3. Анализ вероятности разрыва сессии: *а* – зафиксирована скорость 1,5 м/с; *б* – зафиксировано количество узлов – 20

(—*) – передача через сотовую сеть; (—■) – передача с использованием D2D

Fig. 3. Session disruption probability analysis: *a* – fixed user speed 1.5 m/s; *b* – fixed number of users is set to 20

Подводя итог, можно заключить, что предлагаемая кластеризация, основанная на пространственной и социальной близости, значительно улучшает некоторые характеристики сети, представляющие интерес для характерных сценариев D2D.

Заключение

Предложенная методика кластеризации мобильных узлов на основании географической и социальной близости, работающих

с технологией D2D, позволяет получить значительный прирост агрегированного трафика в системе, что показано в данной статье с использованием имитационного моделирования. В частности, продемонстрировано, что получаемый положительный прирост суммарного трафика, а также снижение вероятности разрыва сессии также привносят дополнительные задержки, связанные с необходимостью установления прямого D2D-соединения между мобильными узлами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asadi A., Wang Q., Mancuso V. A survey on device-to-device communication in cellular networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16. No. 4. Pp. 1801–1819.
2. Araniti G., Orsino A., Militano L., et al. Context-aware information diffusion for alerting messages in 5G mobile social networks // IEEE Internet of Things Journal. 2016. Vol. 4. No. 2. Pp. 427–436.
3. Zhang B., Li Y., Jin D., Hui P., Han Z. Social-aware peer discovery for D2D communications underlying cellular networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2015. Vol. 14. No. 1. Pp. 177–190.
4. Person L., Gotsurve P. World LTE market – opportunities and forecasts, 2012–2020 // Allied Market Research, Report. 2014. IC 14144. P. 107.
5. Andreev S., Galinina O., Pyattaev A., et al. Exploring synergy between communications, caching, and computing in 5G-grade deployments // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. No. 8. Pp. 60–69.
6. Ahmed E., Yaqoob I., Gani A., et al. Social-aware resource allocation and optimization for D2D communication // IEEE Wireless Communications. 2017. Vol. 24. No. 3. Pp. 122–129.
7. Militano L., Orsino A., Araniti G., Iera A. NB-IoT for D2D-enhanced content uploading with social trustworthiness in 5G systems // Future Internet. 2017. Vol. 9. No. 3. P. 31.
8. Gandotra P., Jha R.K., Jain S. A survey on device-to-device (D2D) communication: Architecture and security issues // J. of Network and Computer Applications. 2017. No. 78. Pp. 9–29.

9. Омётов А.Я., Андреев С.Д., Левина А.Б. и др. Обеспечение информационной безопасности прямых соединений 5G при изменении скорости движения абонентов и наличии сотового содействия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. No. 1.

10. Brockmann D., Hufnagel L., Geisel T. The scaling laws of human travel // *Nature*. 2006. No. 439. Pp. 462–465.

11. Orsino A., Kovalchukov R., Samuylov A., et al. Caching-aided collaborative D2D operation for predictive data dissemination in industrial IoT // *IEEE Wireless Communications*. 2018. Vol. 25. No. 3. Pp. 50–57.

Статья поступила в редакцию 23.07.2019.

REFERENCES

1. Asadi A., Wang Q., Mancuso V. A survey on device-to-device communication in cellular networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, Vol. 16, No. 4, Pp. 1801–1819.

2. Araniti G., Orsino A., Militano L., et al. Context-aware information diffusion for alerting messages in 5G mobile social networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, Vol. 4, No. 2, Pp. 427–436.

3. Zhang B., Li Y., Jin D., Hui P., Han Z. Social-aware peer discovery for D2D communications underlying cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, Vol. 14, No. 1, Pp. 177–190.

4. Person L., Gotsurve P. World LTE market – opportunities and forecasts, 2012–2020. *Allied Market Research*, Report, 2014, IC 14144, P. 107.

5. Andreev S., Galinina O., Pyattaev A., et al. Exploring synergy between communications, caching, and computing in 5G-grade deployments. *IEEE Communications Magazine*, 2016, Vol. 54, No. 8, Pp. 60–69.

6. Ahmed E., Yaqoob I., Gani A., et al. Social-aware resource allocation and optimization for D2D

communication. *IEEE Wireless Communications*, 2017, Vol. 24, No. 3, Pp. 122–129.

7. Militano L., Orsino A., Araniti G., Iera A. NB-IoT for D2D-enhanced content uploading with social trustworthiness in 5G system. *Future Internet*, 2017, Vol. 9, No. 3, P. 31.

8. Gandotra P., Jha R.K., Jain S. A survey on device-to-device (D2D) communication: Architecture and security issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, No. 78, Pp. 9–29.

9. Ometov A., Andreev S., Levina A., et al. On information security solutions applicable to D2D communications within 5G domain: Analyzing the influence of user mobility. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, Vol. 17, No. 1. (rus)

10. Brockmann D., Hufnagel L., Geisel T. The scaling laws of human travel. *Nature*, 2006, No. 439, Pp. 462–465.

11. Orsino A., Kovalchukov R., Samuylov A., et al. Caching-aided collaborative D2D operation for predictive data dissemination in industrial IoT. *IEEE Wireless Communications*, 2018, Vol. 25, No. 3, Pp. 50–57.

Received 23.07.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ОМЕ́ТОВ Александр Ярославич

OMETOV Aleksandr Ya.

E-mail: aometov@hse.ru

ЖИДА́НОВ Константин Александрович

ZHIDANOV Konstantin A.

E-mail: konstantin.zhidanov@gmail.com

БЕЗЗАТЕ́ЕВ Сергей Валентинович

BEZZATEEV Sergey V.

E-mail: bsv@aanet.ru

КУЧЕРЯ́ВЫЙ Евгений Андреевич

KOUCHERYAVY Yevgeni A.

E-mail: ykoucheryavy@hse.ru

DOI: 10.18721/JCSTCS.12306
УДК 004.896

МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ АЛГОРИТМЫ СОГЛАСОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

В.Э. Ковалевский, В.А. Онуфриев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена задача согласования значений ключевых показателей эффективности производства с учетом их иерархичности и взаимосвязанности. Разработана структурная схема иерархической мультиагентной системы управления производством: показаны горизонтальные (одноуровневые) и вертикальные (разноуровневые) связи между агентами. Описаны возможные ситуации для одноуровневых и разноуровневых взаимодействий агентов, таких как изменение задания со стороны руководящего программного агента, уведомление его о невозможности поддержания установленного ранее режима работы и др. Изучены алгоритмы обмена данными между ними в целях оптимизации ключевых показателей эффективности. Показана клиент-серверная архитектура связи агентов для реализации указанных алгоритмов передачи данных, в том числе для обмена данными с программируемыми логическими контроллерами на нижнем уровне. Представлена однобайтовая система команд взаимодействия.

Ключевые слова: киберфизические системы, интеллектуальные системы управления, мультиагентные системы, цифровые двойники, Industry 4.0.

Ссылка при цитировании: Ковалевский В.Э., Онуфриев В.А. Мультиагентные алгоритмы согласования ключевых показателей эффективности предприятия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 67–80. DOI: 10.18721/JCSTCS.12306

MULTI-AGENT ALGORITHMS FOR ENTERPRISE'S KEY PERFORMANCE INDICATORS RECONCILIATION

V.E. Kovalevsky, V.A. Onufriev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

In this work the task of production key performance indicators' values reconciliation is set, that takes into account their hierarchical structure and interrelationships. The structural scheme of a hierarchical multiagent system for production control was developed where horizontal (sibling) and vertical (multilevel) connections between agents are shown. Then possible situations of sibling and multilevel interactions are described, such as changing of a task by the controlling agent, sending notifications about the impossibility of a maintaining current operation mode, and others. The agents' data exchange algorithms, which are used in order to

optimise key performance indicators are shown. The implementation of developed algorithms using client-server architecture is shown, which also includes at the bottom level data exchange between the agents and programmable logic controllers. The single bytes command system for agents interactions is described.

Keywords: cyber-physical systems, intelligent control systems, multiagent systems, digital twin, Industry 4.0.

Citation: Kovalevsky V.E., Onufriev V.A. Multi-agent algorithms for enterprise's key performance indicators reconciliation. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 3, Pp. 67–80. DOI: 10.18721/JCSTCS.12306

Введение

Современными трендами развития промышленности являются концепции Industry 4.0 [1–3], IIoT [4], Digital Twins [5–7]. Согласно им, вместо централизованной системы контроля и управления предприятием должны выступать мультиагентные децентрализованные системы, в которых на нижних уровнях действуют противоаварийное оборудование и программируемые логические контроллеры (ПЛК), а на верхних – способные работать независимо друг от друга агенты.

На современном этапе развития промышленности возрастает роль разработки единой системы заводского производственного оборудования [8] с тем, чтобы все мощности завода в конечном итоге работали на достижение общих целей, которые количественно выражаются в ключевых показателях эффективности (Key Performance Indicator – KPI) [9]. Если речь идет об управлении всем предприятием, и показатели описывают работу всего предприятия, то тогда они называются *KPI верхнего уровня*.

Конкретные цеха и иные подразделения предприятия также имеют свои KPI, но они уже лежат уровнем ниже [10]. Внизу данной иерархии показателей находятся параметры отдельных установок и их частей, режимы их функционирования, преобразуемые к значениям KPI с помощью нейросетевых моделей нижнего уровня. Очевидно, что KPI нижнего уровня должны быть согласованы с ключевыми показателями эффективности цеха, подразделения, а также KPI самого верхнего уровня.

Следовательно, в иерархии KPI показатели более высоких уровней определяют требуемое значение показателей более низких уровней и в то же время зависят от них.

В рамках данной статьи предполагается, что математические зависимости между показателями разных уровней уже найдены, например, при помощи описанного ранее подхода в [11]. При использовании мультиагентного подхода требуется предложить алгоритмы взаимодействия агентов с целью принятия решений в рамках сетевого взаимодействия [12, 13]. Сложность проектирования сквозных систем управления предприятием является достаточно высокой, из-за чего в общем случае предлагаются лишь средства сопровождения коллективного поиска решений людьми [14].

Иерархические мультиагентные системы управления

Вопрос внедрения мультиагентного подхода в работу промышленного производства давно изучается различными исследовательскими коллективами. Разные статьи предлагают задействовать этот подход для разных аспектов производства. В частности, можно выделить следующие варианты использования мультиагентных систем в производстве: планирование производственных процессов; диагностика неисправностей, управление и контроль работы; гибкая и легко масштабируемая реконфигурация сборочных линий; виртуальные производства, управление поставками и аутсорсингом. Часто мультиагентные системы управления состоят не из полностью автономных одноуровневых агентов, а из иерархии аген-

тов, в которой агент верхнего уровня получает только те данные, которые нужны ему для работы, и который координирует работу подчиненных агентов, но не диктует им какие действия выполнять.

В статье [15] приведена иерархическая распределенная система управления производством, в которой на каждом уровне производственной иерархии есть свои интеллектуальные агенты, отвечающие за работу своего уровня. Однако в этой системе обмен данными между агентами осуществляется с использованием механизма доски объявлений, и приведен пример лишь координации снизу вверх, когда в работе агента нижнего уровня возникают неполадки, и он сообщает об этом вышестоящему агенту. Обмен данными сверху вниз тоже заявлен, однако никаких подробностей не приведено и непонятно возможно ли напрямую обрабатывать данные от ERP системы, находящейся на самом верху производственной иерархии.

В статье [16] описана система энерго-распределения и энергогенерации, состоящая из многих локальных систем, генерирующих энергию. Для взаимодействия между ними используется иерархическая мультиагентная система, в которой вышестоящий агент координирует работу нескольких нижестоящих агентов. Агент верхнего уровня отвечает за взаимодействие с государственной электросетью и за подачу в неё электроэнергии из локальной системы. С верхнего уровня в систему поступают задания, которые передаются для исполнения на нижние уровни. Присутствует система диагностики и контроля, но она находится на среднем уровне иерархии, так что нижние уровни не способны самостоятельно обрабатывать возникающие ошибки и могут только передавать информацию наверх.

В статье [17] рассмотрено управление системой охлаждения корабля, в которой присутствует трехуровневая иерархия из агентов, где на верхнем уровне находится агент, декомпозирующий задания и выдающий их подчиненным агентам, а на ниж-

нем — агенты, непосредственно контролирующие оборудование. Назначение заданий осуществляется с помощью контрактного сетевого протокола (Contract Net). Задания являются конкретными действиями, которые нижестоящий агент должен выполнить. В системе присутствует схема распределения заданий, но нет диагностики и контроля работы, и агенты нижнего уровня не могут сами инициировать изменение режима работы.

Статья [18] посвящена использованию мультиагентного подхода на уровне отдельного цеха, в котором существует агент, выдающий производственные задания, агенты, отвечающие за работу оборудования, и другие вспомогательные агенты. Назначение задания определенному агенту нижнего уровня осуществляется методом аукциона. Таким образом, агенты нижнего уровня только получают задания, которые могут либо выполнить, либо отклонить, но не могут сами инициировать изменение задания. Агенты мониторинга в этой системе отвечают за визуализацию данных, а поиск и устранение ошибок во многом ложится на плечи оператора-человека. Также в данной работе отсутствует взаимодействие между разными цехами.

При разработке взаимодействия между агентами в иерархической системе управления следует учесть несколько возможных сценариев, в результате которых возникает необходимость обмена данными. Например, ситуация, в которой на уровне стратегического планирования было изменено производственное задание, и это изменение повлекло за собой изменение и пересчет KPI нижних уровней. Либо обратный сценарий, похожий на сценарий диагностики, описанный в [11], в котором система постоянно проверяет свое состояние, опираясь на фиксированные в базе знаний установки KPI, и в случае необходимости отправляет запросы на уровень выше. Однако в указанной работе система являлась централизованной, все данные поступали в единый центр, где и происходило принятие решений.

Рассмотренные выше работы исследуют различные варианты иерархической мультиагентной системы управления. Но либо в них приводится только односторонняя передача данных от агента к агенту, либо передаваемые задания слишком конкретны, либо в схеме участвует оператор-человек.

Цель нашего исследования состоит в разработке (алгоритмически и технологически) автономной системы управления, которая, используя мультиагентный подход и ключевые показатели эффективности каждого уровня производственной иерархии, обеспечивает возможность гибкого изменения производственных планов и их коррекцию в ситуациях изменения производственного задания и изменения технологической ситуации.

Для этого необходимо выполнить следующие задачи: произвести моделирование универсальной схемы распределения управляющих агентов по процессам и показателям в рамках всей производственной вертикали; разработать соответствующие цели алгоритмические модели взаимодействия между агентами; разработать протоколы обмена данными о КРІ (также при помощи алгоритмического моделирова-

ния); синтезировать систему команд для работы в рамках предложенных ситуаций.

Для создания иерархической системы, состоящей из агентов, каждый из которых отвечает за свой уровень в производственной вертикали, необходимо декомпозировать производственные процессы, разбить их на подпроцессы и т. д. до самого нижнего уровня. У каждого такого подпроцесса затем следует выявить КРІ, их предельные значения, после чего рассчитать нейросетевые модели связи КРІ соседних уровней, например, как в работах [11, 19]. Затем, используя эти данные, создать агентов, «отвечающих» за свои процессы (их показатели) в иерархии. Таким образом, каждый агент связан с определенным подпроцессом и контролирует его.

Учитывая приведенные шаги, мы предлагаем следующую смоделированную при помощи IDEF0-подхода схему распределения управляющих агентов по процессам и показателям в рамках производственной вертикали (рис. 1). На самом нижнем уровне иерархии, представленной на рис. 1, показаны процессы нижнего уровня, непосредственно управляемые также с участием ПЛК.

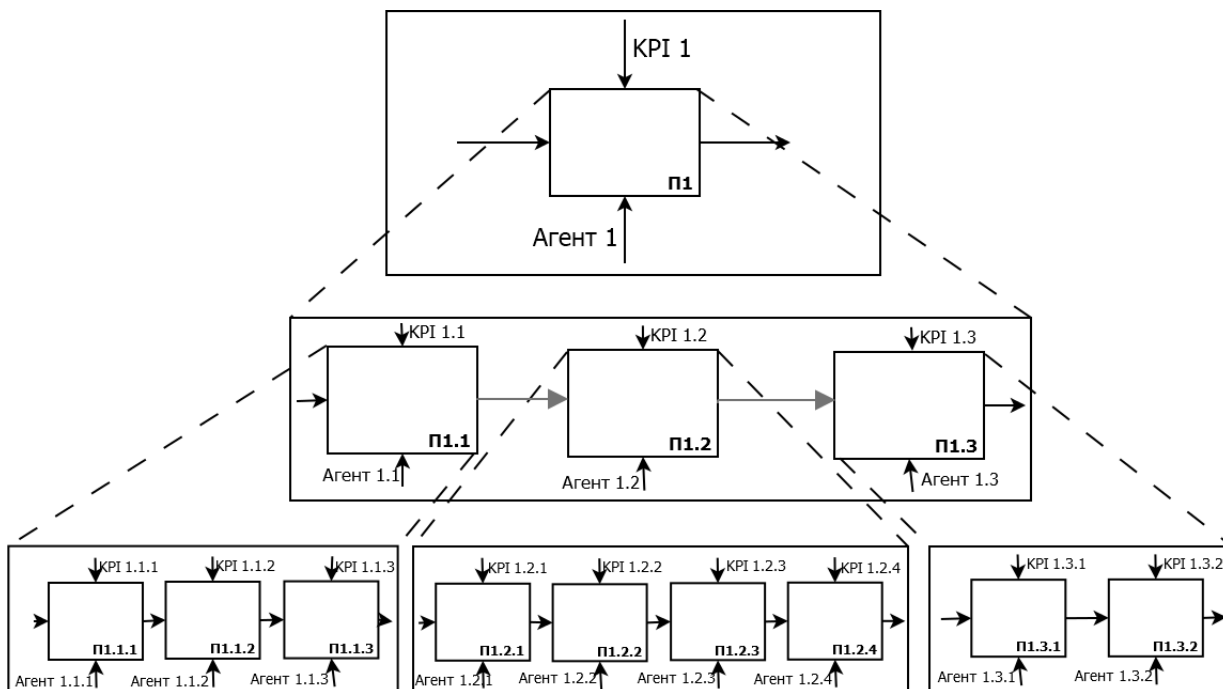


Рис. 1. Иерархическая схема распределения управляющих агентов

Fig. 1. Hierarchical distribution of control agents

После того как определена иерархическая структура распределения агентов по подпроцессам, следует разработать алгоритмы их информационного взаимодействия. Такое взаимодействие возможно как между агентами одного, так и разных уровней.

Алгоритмы взаимодействия разноуровневых агентов

У каждого агента в базе знаний хранится информация о требуемых значениях своих КРІ и об их предельных значениях, о требуемых значениях КРІ подчиненных ему агентов, а также их предельных значениях, и об их аналитической взаимосвязи, показывающей, как изменение любого КРІ агента нижнего уровня влияет на КРІ верхнего — и наоборот.

В этой связи рассмотрим ситуацию, когда *от агента верхнего уровня* поступает указание на необходимость изменения КРІ нижнего уровня. Например, «сверху» (от агента уровня стратегического планирования) вниз (к агенту, управляющему цехом завода) спускается указание на увеличение скорости производства продукции (собственный КРІ этого агента, зависящий от работы агентов установок цеха). Получив такое указание, агент должен определить, какие изменения в свою работу должен внести каждый из подчиненных ему агентов, чтобы вся система обеспечивала спущенное «сверху» изменение его собственных КРІ. Для этого он использует информацию, находящуюся в его базе знаний, и нейросетевую модель, описывающую взаимосвязь между его КРІ и КРІ подчиненных ему агентов. Поскольку взаимосвязи между КРІ жестко заданы моделью, то их пересчет является не оптимизационной, а простой вычислительной задачей (оптимизация будет рассмотрена в другой публикации).

Затем агент проверяет при помощи данных о предельных значениях КРІ нижестоящих агентов, способны ли они обеспечить предписанные им уровни показателей. Если (по его данным) неспособны, то он отправляет соответствующий от-

вет вверх по иерархии. Если изменение возможно, то агент отправляет запросы на изменение работы нижестоящих агентов (в форме новых уставок КРІ). Каждый из них в свою очередь должен проверить, способен ли он вместе со всей подчиненной ему структурой реализовать данное изменение задачи. В случае невозможности он выдает отказ вышестоящему агенту.

Процесс повторяется для каждого уровня иерархии. Но если на верхних уровнях проверяются потенциальные возможности соответствовать новому заданию, то в случае с агентом нижнего уровня (к которому подключены ПЛК) поступившее задание соотносится только с полученной с ПЛК технической информацией и собственными нейросетевыми моделями, приводящими технические параметры в соответствие со спускаемыми «сверху» требованиями к КРІ.

Схема взаимодействия разноуровневых агентов при иницировании изменений «сверху» представлена на рис. 2.

В то же время нужно помнить о том, что *снизу вверх* также могут поступать критические уведомления, которые могут влиять на производство в целом и иницировать сценарий изменения заданий (инициация «снизу»). К данному классу ситуаций относится отправка уведомления вышестоящему агенту о невозможности далее поддерживать текущие требуемые уровни КРІ либо, напротив, уведомление о возможности увеличения (улучшения) значения КРІ.

Однако об этих и других изменениях должны также уведомляться и агенты того же уровня иерархии, т. к. в рамках одного уровня агенты связаны более тесно: показатели таких агентов более заметно влияют на их совместную работу.

Технологические установки в рамках одного цеха должны знать о работе друг друга, поскольку, например, готовая продукция одной установки может быть исходным сырьем для другой, и в случае появления проблем на первой следующие в производственной цепочке должны быть об этом

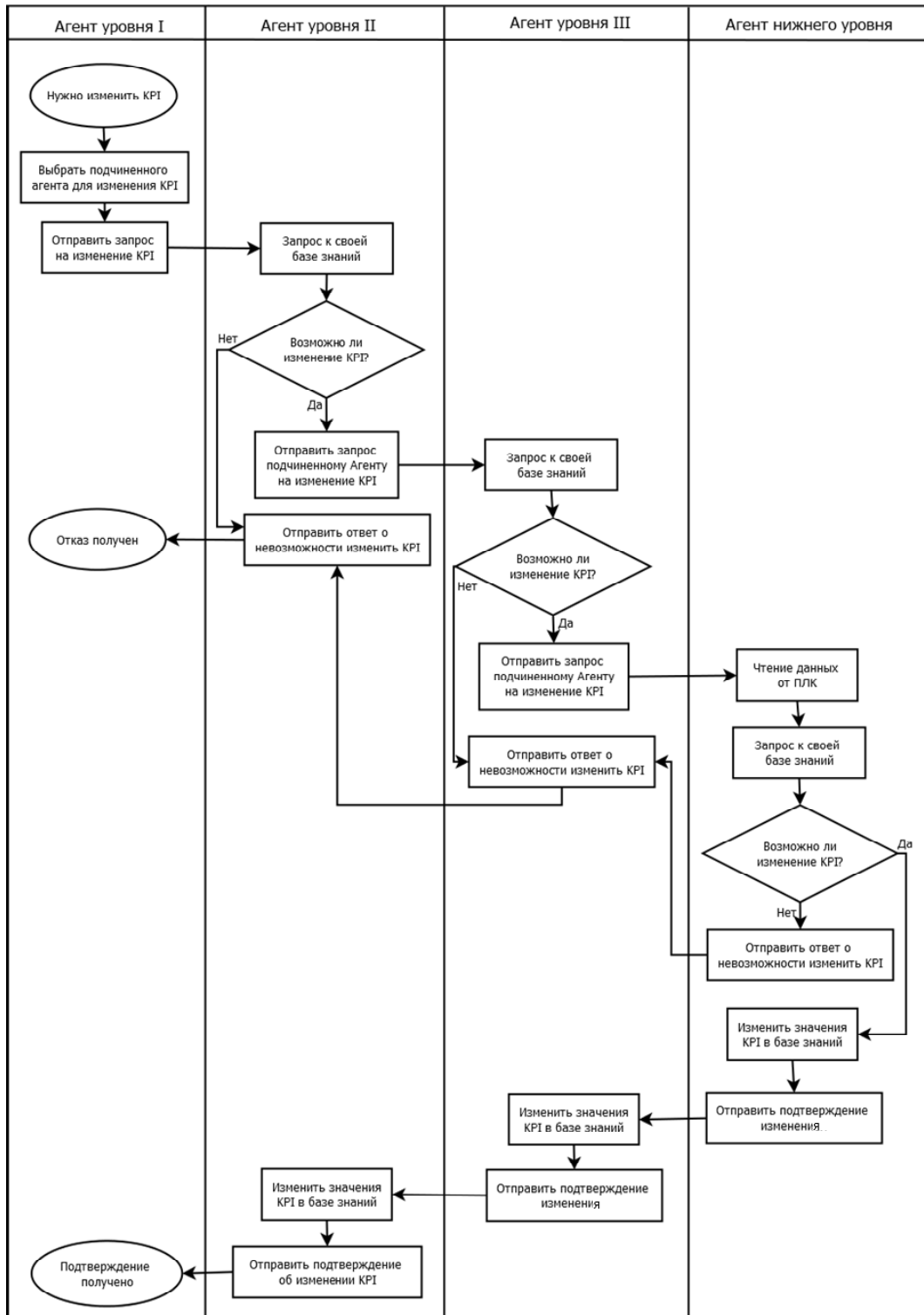


Рис. 2. Алгоритм взаимодействия разноуровневых агентов

Fig. 2. The interaction algorithm of multilevel agents

оперативно уведомлены, чтобы иметь возможность своевременно перепланировать свою работу и/или минимизировать простои в работе оборудования. Либо наоборот, если у одной установки появляется возможность производить больше продукции, тогда её агент должен уведомить другие, которые непосредственно связаны с ней в цепочке, о необходимости изменения и повышения КРІ.

На уровне завода в целом отдельные цеха также должны получать сведения о работе друг друга, поскольку продукция одного цеха может поступать для дальнейшей обработки в другой цех. Поэтому на каждом уровне существует необходимость обмена данными, и у каждого агента в базе знаний также должна храниться информация о возможных значениях КРІ предыдущего и следующего в цепочке агента.

В связи со сказанным выше рассмотрим процесс одноуровневого взаимодействия агентов, в результате которого также происходит передача запроса на изменение КРІ снизу вверх.

Алгоритмы взаимодействия одноуровневых агентов

Рассмотрим ситуацию, когда в связи с ухудшением качества исходных материалов установке требуется больше сырья, чтобы работать с теми же показателями КРІ. В этом случае ее агент отправляет *запрос к агенту предшествующей установке* и запрашивает изменение его КРІ (например, передачу большего количества материала).

Агент, получивший такой запрос, в свою очередь проверяет (уточняет у своих «подчиненных») возможность изменения своего КРІ, и если такая возможность существует, то он отправляет запрос на изменение КРІ выше по иерархии. Если на верхнем уровне разрешают изменение КРІ, то агент верхнего уровня пересчитывает соответствующие значения КРІ в своей базе знаний и отправляет подтверждение подчиненному агенту. Подчиненный агент меняет свой КРІ и отправляет подтвержде-

ние агенту, который следует за ним в производственной цепочке.

Если агент, у которого запросили изменение КРІ, не может выполнить такое изменение, либо если с верхнего уровня ему не подтвердили изменение КРІ, то он отправляет отказ запросившему агенту, и тот отправляет уведомление по иерархии выше о невозможности сохранения текущего КРІ и о необходимости пересчета показателей для других агентов данной цепочки. Схема взаимодействия агентов представлена на рис. 3.

Когда повышение качества сырья позволяет установке производить больше материалов, агент отправляет запрос на изменение КРІ *следующему в производственной цепочке агенту*. В остальном схема похожа на предыдущую. Агент, получивший запрос на изменение КРІ, проверяет свою базу знаний, передает запрос выше по иерархии, а затем отправляет назад подтверждение или отказ.

Далее рассмотрим реализацию алгоритмов обмена данными между агентами.

Реализация обмена данными агент-агент

Обмен данными между агентами одного либо различных уровней иерархии в нашем случае реализован с использованием протокола ТСР/ІР. Обмен данными в таком случае осуществляется по клиент-серверной схеме. Сервер открывает соединение по определенному порту, циклически считывает поступающие на этот порт запросы и отправляет клиенту соответствующие ответы. Клиент, зная ІР-адрес сервера и порт, к которому необходимо подключиться, подключается к серверу и начинает отправлять ему запросы и получать ответы. Обмен данными происходит как прием и отправка различных наборов байт.

Каждый агент знает ІР-адреса подчиненных ему агентов, адрес вышестоящего по иерархии агента и адреса соседних по производственной цепочке агентов. У каждого агента есть как серверная часть, отвечающая за прием запросов от других агентов, так и клиентская, позволяющая такие запросы отправлять.

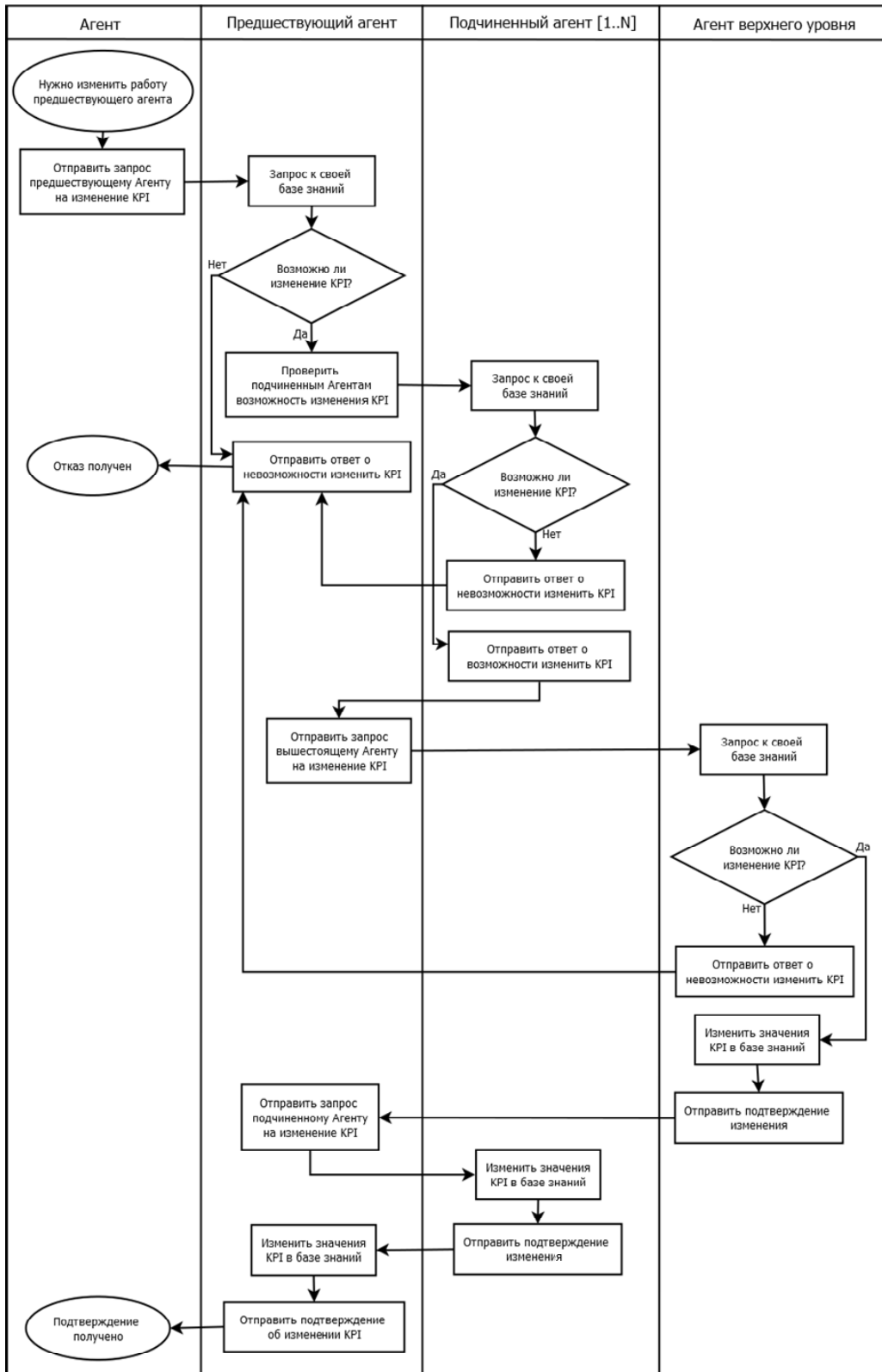


Рис. 3. Алгоритм взаимодействия одноуровневых агентов
 Fig. 3. Algorithm of interaction of single-level agents

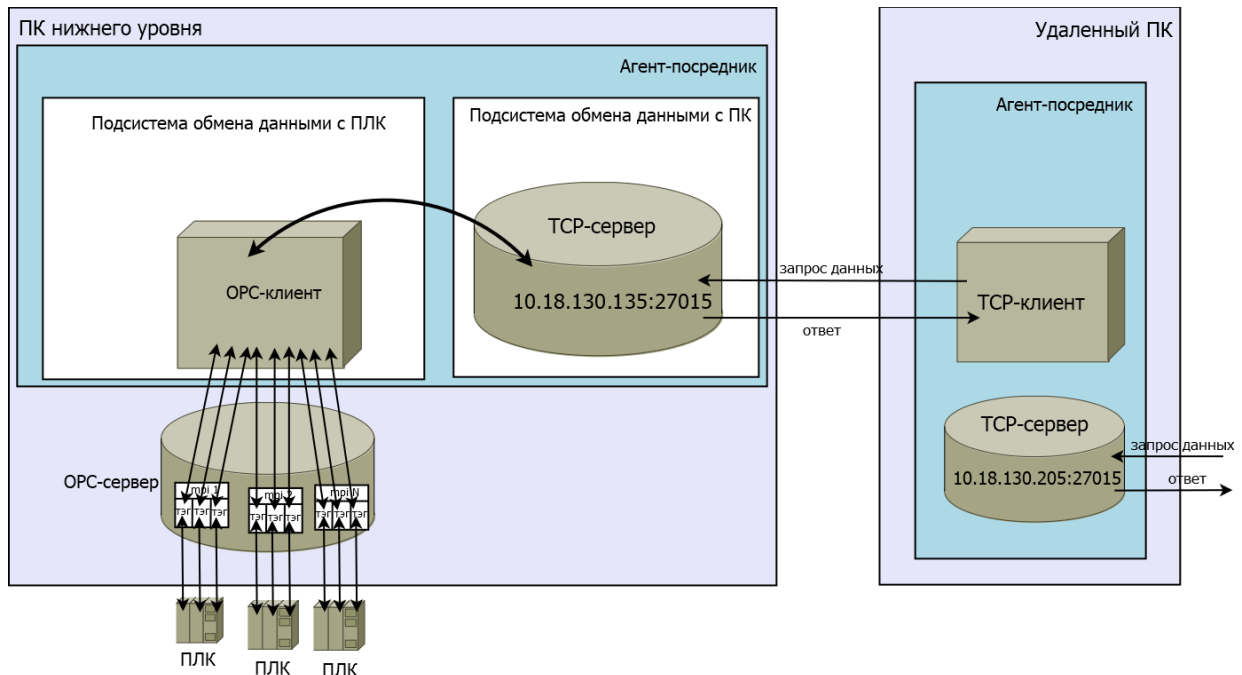


Рис. 4. Структурная схема агента нижнего уровня

Fig. 4. The block diagram of the agent lower level

Схема клиент-серверного взаимодействия с удаленным компьютером и общая схема агента нижнего уровня, и его взаимодействие с ПЛК и удаленным ПК представлены на рис. 4.

Приведем разработанную систему обмена данными, в которой запросы агентов и ответы на них представлены в форме определенных последовательностей байтов.

Первый байт пакета характеризует цель запроса:

- 01 – команда на изменение КРІ у нижестоящего с проверкой возможности изменений;
- 02 – ответ (подтверждение/отказ) на команду на изменение КРІ;
- 03 – команда на изменение КРІ у следующего/предыдущего по цепочке;
- 04 – запрос на разрешение у вышестоящего на изменение своего КРІ;
- 05 – критические уведомления о максимально возможном поддерживаемом значении КРІ;
- 06 – команда на изменение КРІ без проверок и подтверждений.

Далее в пакете указывается объект, над которым нужно произвести действие (в случае команды), либо объект, о котором получатель будет оповещен (в случае уведомления).

Такой объект обозначается уникальным в рамках всей системы идентификатором, для чего, в зависимости от количества таких объектов, может быть отведено различное количество байтов. В нашем случае идентификатор представляет собой однобайтовое целое число, например:

- 78 – температуры;
- 163 – расход;
- 250 – скорость конвейерной ленты.

Далее следует один или несколько байтов, содержащих информацию, касающуюся объекта, идентификатор которого указан ранее. В случае запроса на изменение в этих байтах должно содержаться требуемое значение показателя, в случае ответа на команду – подтверждение ее выполнения или отказ.

Приведем пример пакетов данных, которыми обмениваются агенты в системе, в случае, который был рассмотрен выше, ко-

гда в связи с ухудшением качества исходных материалов установке требуется больше сырья, и ее агент отправляет *запрос к агенту предшествующей установки* и запрашивает изменение его КРІ.

Вначале агент отправляет запрос на изменение КРІ к агенту предшествующей установки:

03	250	70
----	-----	----

Агент предшествующей установки в свою очередь отправляет запрос на изменение КРІ своим подчиненным агентам:

01	85	17	...	01	163	23
----	----	----	-----	----	-----	----

Подчиненные агенты отправляют ответы вышестоящему агенту:

02	85	1	...	02	163	1
----	----	---	-----	----	-----	---

Получив положительный ответ от подчиненных агентов, агент предшествующей установки в свою очередь запрашивает разрешение на изменение КРІ у вышестоящего агента:

04	250	70
----	-----	----

Получив от него положительный ответ, агент посылает команду на изменение КРІ своим подчиненным

06	85	17	...	06	163	23
----	----	----	-----	----	-----	----

и уведомляет агента следующей установки о том, что КРІ был изменен:

02	250	1
----	-----	---

Данная схема представляет собой пример обмена данными между агентами трех уровней, в которой агент нижнего уровня непосредственно получает данные с ПЛК. Для реализации этой схемы необходимо, чтобы агенты нижнего уровня имели техническую возможность не только получения данных непосредственно с ПЛК, но и

обмена данными с другими агентами. Для этого они должны иметь в своем составе, например, модуль Wi-Fi или поддержку проводного сетевого интерфейса.

Реализация обмена данными агент-ПЛК

К настоящему времени различными исследовательскими группами уже создан целый ряд фреймворков, программных библиотек и иного инструментария для разработки мультиагентных систем. Большинство таких библиотек разработано на языке Java (например AnyLogic, Cougaar, JADE), обеспечивающим большую гибкость разработки. Однако такие средства подходят больше для моделирования различных взаимодействующих между собой систем, чем для использования в реальных проектах. Там, где существуют повышенные требования к быстродействию и ограничения на объем используемой памяти, больше подходит язык C++ [15].

В связи с этим специальный программный агент-посредник, отвечающий за обмен данными по предложенному алгоритму как между разными уровнями производственной иерархии, так и внутри одного уровня, разработан на языке C++. Такой агент находится в каждом узле иерархии и отвечает за сбор и передачу данных на другие уровни либо на том же уровне.

На нижнем уровне иерархии промышленного производства находятся отдельные установки, которые непосредственно выполняют задачи по обработке исходных материалов для получения требуемой продукции. Контроль и управление отдельными элементами, входящими в состав установки, осуществляется с помощью ПЛК. ПЛК обеспечивают функционирование оборудования согласно заложенной производственной программе, но сами при этом не являются агентами иерархической системы управления.

В связи со сказанным выше, у агента-посредника, находящегося на нижнем уровне иерархии, реализованы две подсистемы: помимо подсистемы обмена данными

ми с другими агентами ему также необходима подсистема обмена данными с ПЛК.

Мы реализовали два варианта подсистемы обмена данными с ПЛК, чтобы была возможность при создании агента нижнего уровня выбрать наиболее подходящий для конкретного случая способ взаимодействия с ПЛК. В зависимости от выбранной подсистемы используется тот или иной способ обмена данными с ПЛК, однако функционирование агента в целом остается одинаковым вне зависимости от выбранного способа обмена данными.

В первом случае агент использует для работы подсистемы обмена данными с ПЛК свободно распространяемую библиотеку libNoDave, разработанную для оборудования фирмы Siemens [16].

В ней реализованы специализированные драйверы для прямого обмена данными с ПЛК через различные интерфейсы (в данном случае был использован USB-интерфейс). Эта библиотека обеспечивает выполнение команд чтения / записи данных по определенным адресам в памяти ПЛК.

Во втором случае агент использует технологию OPC (OLE for Process Control), подразумевающую наличие OPC-сервера и OPC-клиента. Использование данной технологии является унифицированным, поскольку в этом случае при разработке нет необходимости привязываться к деталям реализации конкретного контроллера, ведь за непосредственную связь с ПЛК в такой схеме отвечает OPC-сервер, в качестве которого было использовано приложение, разработанное в среде SIMATIC WinCC Flexible.

Структурная схема агента нижнего уровня, использующего для обмена данными с ПЛК технологию OPC представлена на рис. 4.

В OPC-сервере прописаны специальные метки (тэги), связанные с определенными ячейками памяти в ПЛК. Агент нижнего уровня при помощи OPC-клиента, обеспечивающего доступ для чтения и записи значений тэгов на OPC-сервере, может их как изменять (что озна-

чает передачу в ПЛК новой информации), так и считывать (получая тем самым с ПЛК технологические данные).

Также для работы OPC-сервера в нем были заданы необходимые сведения о подключении к ПЛК. В OPC-сервере было создано несколько соединений, чтобы считывать данные из разных ПЛК.

В итоге, например, тэг 4В1 (датчик уровня резервуара 4) имеет адрес I0.0, а тэг 4М2 (управление насосом четвертого резервуара) – Q0.1, где I и Q обозначают соответственно область входов и выходов ПЛК.

Реализованный таким образом агент нижнего уровня способен как обмениваться с ПЛК технической информацией, так и запрашивать/уведомлять об изменении КРІ других агентов.

В процессе разработки агенты верхних уровней реализуются нами на одноплатных компьютерах Raspberry Pi 3b, а программа-агент нижнего уровня запущена на ПК, подключенном к ПЛК.

Для отработки предложенных алгоритмов агенты нижнего уровня реализованы как программные модули, запущенные на ПК со следующими характеристиками: Intel Pentium Dual CPU E2200 2.20GHz, 3Гб. ОЗУ, работающие под управлением ОС Windows 7 и имеющие модуль Wi-Fi для обмена данными с другими агентами. Агенты верхних уровней реализованы на одноплатных компьютерах Raspberry Pi 3b, также имеющих в своем составе модули Wi-Fi для обмена данными. База знаний каждого агента, которая содержит необходимые сведения о КРІ и их предельно допустимых значениях, хранится в виде файлов в формате N3/TURTLE (язык представления знаний, входящий в состав среды RDF). Информация о взаимосвязях между различными КРІ представляет собой нейросетевые модели, которые хранятся в виде матрицы значений.

Заключение

Разработанные алгоритмы и их реализация направлены на согласование работы программных агентов, участвующих в про-

цессе управления предприятием на всех уровнях: от ПЛК до ERP. Рассмотрены, разумеется, не все возможные возникающие ситуации при их взаимодействии, однако представленного материала достаточно для адаптации предложенного решения для произвольной системы управления производством.

В данной статье также предполагается, что любой из вышестоящих агентов обла-

дает информацией о предельно возможных значениях КРІ всех непосредственно подчиненных ему агентов, однако задачу этих расчетов и передачи сведений еще предстоит решить. Также в дальнейшем необходимо реализовать прототип системы на микропроцессорных отладочных платах, для чего, возможно, потребуется модифицировать алгоритмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bassi L.** Industry 4.0: Hope, hype or revolution? // IEEE 3rd Internat. Forum on Research and Technologies for Society and Industry. 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065927
2. **Kannengiesser U., Müller H.** Multi-level, viewpoint-oriented engineering of cyber-physical production systems: An approach based on Industry 4.0, system architecture and semantic web standards // 44th Euromicro Conf. on Software Engineering and Advanced Applications. 2018. Pp. 331–334. DOI: 10.1109/SEAA.2018.00061.
3. **Cheng G.-J., Liu L.-T., Qiang X.-J., Liu Y.** Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing // Internat. Conf. on Information System and Artificial Intelligence. 2016. Pp. 407–410. DOI: 10.1109/ISAI.2016.0092
4. **Mumtaz S., Alshaily A., Pang A., Rayes A., Tsang K.F., Rodriguez J.** Massive Internet of Things for industrial applications: Addressing wireless IoT connectivity challenges and ecosystem fragmentation // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2017. Vol. 11(1). Pp. 28–33. DOI: 10.1109/MIE.2016.2618724
5. **Vachálek J., Bartalický L., Rovný O., Šišmišová D., Morhác M., Lokšnk M.** The digital twin of an industrial production line within the Industry 4.0 concept // 21st Internat. Conf. on Process Control. 2017. Pp. 258–262. DOI: 10.1109/PC.2017.7976223
6. **Yusen X., Bondaletova N.F., Kovalev V.I., Komrakov A.V.** Digital twin concept in managing industrial capital construction projects life cycle // 11th Internat. Conf. on Management of Large-Scale System Development. 2018. Pp. 1–3. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551867
7. **Tao F., Zhang M.** Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing // IEEE Access. 2017. No. 5. Pp. 20418–20427. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756069
8. **Eckhardt A., Müller S., Leurs L.** An evaluation of the applicability of OPC UA publish subscribe on factory automation use cases // IEEE 23rd Internat. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation. Turin, 2018. Pp. 1071–1074. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502445
9. **Габдрашитова Э.И., Гамилова Д.А.** Оценка производственного потенциала нефтесервисных предприятий // Наукоеведение. 2014. № 3 // URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/30EVN314.pdf> (Дата обращения: 28.03.2019).
10. **Буренина И.В., Варакина В.А.** Система единых показателей оценки эффективности деятельности вертикально-интегрированных нефтяных компаний // Наукоеведение. 2014. № 1 // URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/12EVN114.pdf> (Дата обращения: 28.03.2019).
11. **Kostenko D., Kudryashov N., Maistrishin M., Onufriev V., Potekhin V., Vasiliev V.** Digital twin applications: diagnostics, optimisation and prediction // Proc. of the 29th DAAAM Internat. Symp. Vienna, Austria, 2018. Pp. 574–581. DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings.083
12. **Ефремов А.Ю., Максимов Д.Ю.** Сетецентрическая система управления – что вкладывается в это понятие? // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения. Труды III Всерос. конф. с междунар. участием. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 158–161.
13. **Скобелев П.О., Царев А.В.** Сетецентрический подход к созданию больших мульти-агентных систем для адаптивного управления ресурсами в реальном времени // Управление большими системами. Матер. Междунар. науч.-практ. мультikonf. 2011. М.: ИПУ РАН, 2011. 267 с.
14. **Скобелев П.О.** Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге // Онтология проектирования. Самара: Новая техника, 2013. Т. 8. № 2. С. 26–47.
15. **Zhang L., Zhang Y.** Research on hierarchical distributed coordination control in process industry based on multi-agent system // 2010 Internat. Conf. on Measuring Technology and Mechatronics Auto-

mation. Changsha City, 2010. Pp. 96–100. DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.683

16. **Zheng G., Li N.** Multi-agent based control system for multi-microgrids // 2010 Internat. Conf. on Computational Intelligence and Software Engineering. Wuhan, 2010. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/CISE.2010.5676818

17. **Shao Y., Wu Y., Chen Y.** Design and research of multi-agent control system for central cooling system // 2014 IEEE 3rd Internat. Conf. on Cloud Computing and Intelligence Systems. Shenzhen, 2014. Pp. 218–221. DOI: 10.1109/CCIS.2014.7175732

18. **Wei C., Mei J.J.C., Shaoting G.** Design of workshop production management control system based on multi-agent // 2016 IEEE 11th Conf. on

Industrial Electronics and Applications. Hefei, 2016. Pp. 427–430. DOI: 10.1109/ICIEA.2016.7603622

19. **Бессонов А.А.** Многокритериальная нейроэволюционная оптимизация нелинейных функций // Системы обработки информации. 2012. № 9 (107). С. 5–10.

20. **Theiss S., Vasyutynskyy V., Kabitzsch K.** AMES – A resource-efficient platform for industrial agents // IEEE Internat. Workshop on Factory Communication Systems. Dresden, 2008. Pp. 405–413.

21. LibNoDave – свободно распространяемая библиотека, для коммуникации с ПЛК Simatic S7 // URL: <http://libnodave.sourceforge.net/> (Дата обращения: 28.03.2019).

Статья поступила в редакцию 04.04.2019.

REFERENCES

1. **Bassi L.** Industry 4.0: Hope, hype or revolution? *IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry*, 2017, Pp. 1–6. DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065927

2. **Kannengiesser U., Müller H.** Multi-level, viewpoint-oriented engineering of cyber-physical production systems: An approach based on Industry 4.0, system architecture and semantic web standards. *44th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications*, 2018, Pp. 331–334. DOI: 10.1109/SEAA.2018.00061.

3. **Cheng G.-J., Liu L.-T., Qiang X.-J., Liu Y.** Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing. *International Conference on Information System and Artificial Intelligence*, 2016, Pp. 407–410. DOI: 10.1109/ISAI.2016.0092

4. **Mumtaz S., Alshaily A., Pang A., Rayes A., Tsang K.F., Rodriguez J.** Massive Internet of Things for industrial applications: addressing wireless IIoT connectivity challenges and ecosystem fragmentation. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2017, Vol. 11(1), Pp. 28–33. DOI: 10.1109/MIE.2016.2618724

5. **Vachálek J., Bartalský L., Rovný O., Šišmišová D., Morhác M., Lokšnk M.** The digital twin of an industrial production line within the Industry 4.0 concept. *21st International Conference on Process Control*, 2017, Pp. 258–262. DOI: 10.1109/PC.2017.7976223

6. **Yusen X., Bondaletova N.F., Kovalev V.I., Komrakov A.V.** Digital twin concept in managing industrial capital construction projects life cycle. *11th International Conference on Management of Large-Scale System Development*, 2018, Pp. 1–3. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551867

7. **Tao F., Zhang M.** Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 2017, No. 5, Pp. 20418–20427. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756069

8. **Eckhardt A., Müller S., Leurs L.** An evaluation of the applicability of OPC UA publish subscribe on factory automation use cases. *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Turin, 2018, Pp. 1071–1074. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502445

9. **Gabdrashitova E.I., Gamilova D.A.** Otsenka proizvodstvennogo potentsiala nefteservisnykh predpriyatii [Assessment of the productive capacity of oilfield service companies]. *Naukovedenie. Online Journal Science studies*, 2014, No. 3. Available: <https://naukovedenie.ru/PDF/30EVN314.pdf> (Accessed: 28.03.2019). (rus)

10. **Burenina I.V., Varakina V.A.** Sistema yedinykh pokazateley otsenki effektivnosti deyatel'nosti vertikalno-integrirovannykh neftyanykh kompaniy [The single indicator system of performance assessment of vertically integrated oil enterprises]. *Naukovedenie. Online Journal Science studies*, 2014, No. 1. Available: <https://naukovedenie.ru/PDF/12EVN114.pdf> (Accessed: 28.03.2019). (rus)

11. **Kostenko D., Kudryashov N., Maystrishin M., Onufriev V., Potekhin V., Vasiliev V.** Digital twin applications: diagnostics, optimisation and prediction. *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium*, Vienna, Austria, 2018, Pp. 574–581. DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings.083

12. **Yefremov A.Yu., Maksimov D.Yu.** Setetsentricheskaya sistema upravleniya – chto vkladyvayetsya v eto ponyatiye? [The network-centric

control system – what is included in this concept?]. *Trudy III Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem: Tekhnicheskiye i programmnyye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya* [3rd All-Russian Conference with International Participation: *Technical and Software Tools for Control, Monitoring and Measurement Systems*]. Moscow: IPU RAN Publ., 2012, Pp 158–161. (rus)

13. **Skobelev P.O., Tsarev A.V.** Setsetricheskij podkhod k sozdaniyu bolshikh multiagentnykh sistem dlya adaptivnogo upravleniya resursami v realnom vremeni [The network-centric approach to creation of big multi-agent system for adaptive real-time resource management]. *Proceedings of the International Scientific and Practical Multi-Conference on Control of Big Systems*, Moscow: IPU RAN Publ., 2011, 267 p. (rus)

14. **Skobelev P.O.** Situatsionnoye upravleniye i multiagentnyye tekhnologii: kollektivnyy poisk soglasovannykh resheniy v dialoge [Situation-driven decision making and multi-agent technology: finding solutions in dialogue]. *Ontologiya proyektirovaniya* [Ontology of Design], Samara: New Technology, 2013, Vol. 8(2), Pp. 26–47. (rus)

15. **Zhang L., Zhang Y.** Research on hierarchical distributed coordination control in process industry based on multi-agent system. *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Changsha City, 2010, Pp. 96–100. DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.683

16. **Zheng G., Li N.** Multi-agent based control system for multi-microgrids. *2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, Wuhan, 2010, Pp. 1–4. DOI: 10.1109/CISE.2010.5676818

17. **Shao Y., Wu Y., Chen Y.** Design and research of multi-agent control system for central cooling system. *2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems, Shenzhen*, 2014, Pp. 218–221. DOI: 10.1109/CCIS.2014.7175732

18. **Wei C., Mei J.J.C., Shaoting G.** Design of workshop production management control system based on multi-agent. *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications*, Hefei, 2016, Pp. 427–430. DOI: 10.1109/ICIEA.2016.7603622

19. **Bessonov A.A.** Mnogokriterialnaya neyroevolyutsionnaya optimizatsiya nelineynykh funktsiy [Multiobjective neuroevolutionary optimization of nonlinear functions]. *Sistemi obrobki informatsii* [Information Processing Systems], 2012, Vol. 9(107), Pp. 5–10. (rus)

20. **Theiss S., Vasyutynskyy V., Kabitzsch K.** AMES – A resource-efficient platform for industrial agents. *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, Dresden, 2008, Pp. 405–413.

21. LibNoDave – A free communication library for Simatic S7 PLCs, Available: <http://libnodave.sourceforge.net/> (Accessed: 28.03.2019).

Received 04.04.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

КОВАЛЕВСКИЙ Владислав Эдуардович
KOVALEVSKY Vladislav E.
 E-mail: vladkov@spbstu.ru

ОНУФРИЕВ Вадим Александрович
ONUFRIEV Vadim A.
 E-mail: ovavadim@gmail.com

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»

«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

Том 12, № 3, 2019

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Редакция журнала

д-р техн. наук, профессор *А.С. Коротков* – главный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *Е.А. Корнукова*

Перевод на английский язык *А.С. Колгатина*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 27.09.2019. Формат 60×84 1/8

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Адрес университета и редакции: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

Сведения о публикациях представлены в РИНЦ, в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Периодичность выхода журнала – 4 номера в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук – 8–15 страниц формата А-4; аспирантов – 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.05.-2008).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул – в редакторе **MathType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт – TNR, размер шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева – 3 см, сверху, снизу – 2,5 см, справа – 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова (5–7) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;
- аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу <http://journals.spbstu.ru>

2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться **ДОСРОЧНО**.

Более подробную информацию можно получить:

на сайте журнала <http://ntv.spbstu.ru>

по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10⁰⁰ до 18⁰⁰ Галина Александровна

или по e-mail: infocom@spbstu.ru