МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации. Управление

Том 11, № 3
2018

Издательство Политехнического университета
Санкт-Петербург
2018

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;
Шкодырев 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 ВИНИТИ 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 и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 552-62-16.

Подписной индекс **47517** в объединенном каталоге «Пресса России».

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

Computer Science. Telecommunications and Control Systems

Vol. 11, No. 3
2018

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2018

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.

Subscription index **47517** in the «Press of Russia» Joint Catalogue.

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2018

Содержание

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Ярцев С.В., Кучерявый Е.А., Владыко А.Г. *Исследование структуры потоков широковещательного трафика в сетях VANET* 7

Федоров А.В., Шкодырев В.П., Барсуков Н.Д. *Система ситуационного управления и контроля плохо формализуемых сценариев динамических сцен* 20

Информационные технологии

Виноградов Е.Л., Коротков Д.С. *Информационная технология исследования оптических свойств бумажных субстратов и модельных оттисков* 29

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

Рашич А.В., Нгуен Т.Н., Сальников В.А. *Расчет пик-фактора многочастотных сигналов с ортогональным и неортогональным частотным уплотнением* 37

Лютин В.И., Десятирикова Е.Н., Белоусов В.Е. *Комплексирование результатов наблюдения датчиками различных физических полей при автоматическом наведении беспилотных летательных аппаратов с учетом арктических геомагнитных особенностей приема сигналов* 49

Инфокоммуникационные технологии в образовании

Кожевников В.А., Сабинин О.Ю. *Система автоматической проверки ответов на открытые вопросы на русском языке* 57

Contents

Telecommunication Systems and Computer Networks

Yartsev S.V., Kucheryavy Ye.A., Vladyko A.G. *Study of broadcasting flow structure in VANET* 7

Fedorov A.V., Shkodyrev V.P., Barsukov N.D. *System of situation management and control of bad formalized scenarios of dynamic scenes* 20

Information Technologies

Vinogradov E.L., Korotkov D.S. *Information technology for study of optical properties of paper substrates and model prints* 29

Circuits and Systems for Receiving, Transmitting and Signal Processing

Rashich A.V., Nguen T.N., Salnikov V.A. *Method for calculating peak-to-average power ratio of OFDM- and SEFDM-signals* 37

Lutin V.I., Desyatirikova E.N., Belousov V.E. *Integrating results from observation by sensors of various physical fields with automatic guidance of unmanned aerial vehicles taking into account Arctic geomagnetic features of receiving signals* 49

Information and Telecommunications Technologies in Education

Kozhevnikov V.A., Sabinin O.Yu. *System of automatic verification of answers to open questions in Russian* 57

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

DOI: 10.18721/JCSTCS.11301
УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОГО ТРАФИКА В СЕТЯХ VANET

С.В. Ярцев[1], Е.А. Кучерявый[2], А.Г. Владыко[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербургский филиал, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведен анализ принципов формирования потоков сообщений в децентрализованной самоорганизующейся автомобильной сети. Аналитическое описание процесса формирования суммарного потока выполнено на основе теоремы Бёрка. Рассмотрен вариант описания параметра потока на основе теории просеянных потоков. Оценка справедливости суждений о структуре суммарного потока в сети и принципов его формирования произведена посредством имитационного моделирования на основе среды NS-2. Разработанные на языке Perl скрипты обработки выходной статистики позволили выполнить оценку принадлежности потока распределению Пуассона при низкой плотности транспортных средств и гамма-распределению при высокой. Вследствие высокой интенсивности поступления требований о передаче сообщений происходит перегрузка сетевого ресурса, что приводит к резкой деградации функционала системы безопасности дорожного движения. На основе результатов оценки полезной загрузки канала удалось сформировать предложения к режиму ретрансляции сообщений с целью повышения эффективности использования сетевого ресурса.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, автомобильные сети, VANET, DSRC, WAVE, система массового обслуживания.

Ссылка при цитировании: Ярцев С.В., Кучерявый Е.А., Владыко А.Г. Исследование структуры потоков широковещательного трафика в сетях VANET // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 3. С. 7–19. DOI: 10.18721/JCSTCS.11301

STUDY OF BROADCASTING FLOW STRUCTURE IN VANET

S.V. Yartsev[1], Ye.A. Kucheryavy[2], A.G. Vladyko[1]

[1]Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russian Federation;

[2] National Research University Higher School of Economics, St. Petersburg, Russian Federation

The paper provides analysis of message flow formation in a decentralized self-organizing vehicular network. An analytical description of the aggregated flow formation is carried out based on Burke's theorem. A variant of flow parameter description based on the sieved stream theory is presented. Next, the aggregated flow structure in the network and the principles of its formation are evaluated using the NS-2 tool. Using customized Perl scripts developed for analysis of output statistics, we have established that the aggregated flow has a Poisson distribution for low vehicle density and a Gamma distribution for high vehicle density. As a consequence of high intensity of messages in the system, the network resource becomes overloaded, which leads to degradation of the functionality of the road safety system as a whole. Based on estimations of the useful channel load, a novel message retransmission protocol was proposed to increase the efficiency of network resource utilization.

Keywords: intelligent transport system, vehicular networks, vehicular Ad-Hoc network, dedicated short-range communication, wireless access in vehicle environment, queuing system.

Citation: Yartsev S.V., Kucheryavy Ye.A., Vladyko A.G. Study of broadcasting flow structure in VANET. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 3, Pp. 7–19. DOI: 10.18721/JCSTCS.11301

Введение

Постоянный прирост автопарка в развивающихся странах привлекает пристальное внимание к проблемам обеспечения безопасности дорожного движения и управления транспортными потоками. В связи с этим интеллектуальные транспортные системы (ИТС) получили широкое распространение как объект многочисленных исследований. Сети VANET являются частью концепции ИТС и предназначены для организации межмашинного информационного обмена. Они представляют собой качественно новый шаг в сфере автомобилестроения и информационных технологий[1].

VANET – представитель Ad-Hoc сетей с динамично меняющейся структурой, где узлами сети являются транспортные средства со специализированными модулями связи. Исследование процесса формирования данного типа сетей и образуемого при этом потока информационных сообщений по-прежнему актуально, не смотря на то, что данным вопросам посвящены сотни исследований на протяжении последнего десятка лет.

Ключевые проблемы

Задача информационного обмена – своевременное оповещение находящихся поблизости участников дорожного движения об опасных ситуациях. При этом термин «своевременно» указывает на необходимость соблюдения требований к задержкам при передаче сообщений через сеть. Данная задача подразумевает необходимость решения сложного вопроса поддержания постоянной взаимосвязи между узлами сети, обеспечивая при этом возможность передачи трафика приложений безопасности с минимальной задержкой[2].

Одной из основных причин задержек в сетях, использующих технологию CSMA/CA, является задержка, формируемая на канальном уровне (MAC)[3]. Данная задержка обусловлена временем, затрачиваемым

[1] ETSI // Intelligent Transport Systems. Vehicular Communications. Basic Set of Applications. Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, Technical Specification (302 637-2) V1.3.2. 2014.

[2] IEEE P1609.0/D9-2017 // IEEE Draft Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)-Architecture. 2017. Pp. 1–104.

[3] IEEE Std 802.11-2016 // IEEE Standard for Information technology. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Revision of IEEE Std 802.11-2012. 2016. Pp. 1–3534.

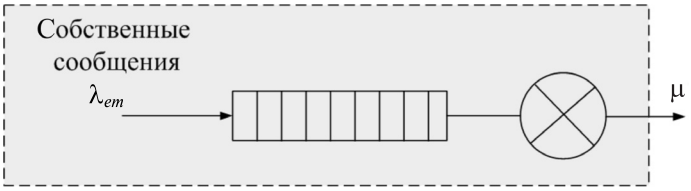

Рис. 1. Схема одиночного узла

Fig. 1. Single node model

на поиск и захват канального ресурса с целью передачи данных. Нетрудно понять, что с ростом численности передающих узлов коэффициент использования канала будет расти. Как следствие, поступающие на обслуживание сообщения будут попадать в очередь до тех пор, пока по истечении таймера отсрочки не появится свободный ресурс для передачи. Таким образом, идеальной ситуацией для надежного функционирования системы обеспечения безопасности на основе VANET является поддержание статистического равновесия, когда количество поступающих заявок в сеть уравновешивается производительностью сети.

В этой статье мы проводим анализ режимов функционирования сети VANET в условиях городской среды. Основная цель – получение представления о способе образования и виде распределения входного потока сообщений, создаваемого группой узлов различной плотности. Понимание данной характеристики крайне важно для планирования системы в целом, поскольку на его основе можно делать предположения о требуемых размерах буферов на узлах и критичных плотностях размещения узлов, при которых работоспособность системы подвержена серьезным трудностям.

Модель узла

В VANET каждое транспортное средство является узлом, оповещающим соседние узлы о собственном состоянии. Данный процесс организуется трансляцией в сеть широковещательных сообщений, что обеспечивает информирование всех узлов, находящихся в зоне возможности успешного приема радиосигнала. Таким образом, в случае отсутствия механизмов многошаговой ретрансляции сообщений, каждый узел сети может быть представлен в виде простейшей одноканальной модели СМО D/G/1 с детерминированным входным потоком и дисциплиной обслуживания FIFO (FirstIn, FirstOut) (рис. 1).

Входным потоком для такой системы является поток собственных сообщений с интенсивностью десять сообщений в секунду [8]. Если канал свободен, сообщения сразу же обслуживаются и транслируются в сеть. Иначе применяется механизм отсрочки передачи с установкой случайного значения таймера. По истечении таймера попытка передачи повторяется. Стоит отметить, что указанный механизм отсрочки приводит к формированию на выходе узла простейшего потока.

Далее следует учесть, что в основе сети VANET лежит стандарт IEEE 802.11p, использующий технологию множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий (CSMA/CA). Особенность данной технологии – совместное использование разделяемой среды передачи. Это говорит о том, что выходы всех узлов «соединены» вместе, что приводит к объединению выходных потоков ото всех узлов, находящихся в зоне радиовидимости $\{\mu_1, \mu_2, ..., \mu_N\}$ в общий поток μ_Σ (рис. 2).

Как показывают исследования, достигнуть дистанции, требуемой для успешной работы системы обеспечения безопасности дорожного движения, можно либо за счет увеличения мощности передатчика [1, 2], либо за счет последовательной ретрансляции сообщений через соседние узлы. Первый способ вполне применим для случая использования вне населенных пунктов [3]. В городах ситуация обстоит несколько иначе, поскольку плотность транспортных

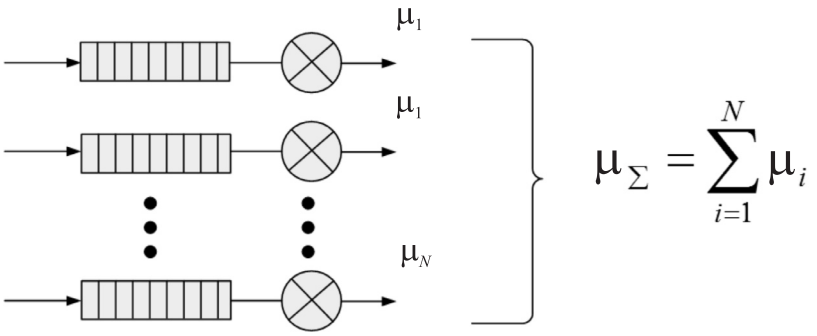

Рис. 2. Сеть VANET как СМО

Fig. 2. VANET as queueing system

средств на дорогах значительно выше и, как следствие, количество требований на использование среды передачи многократно возрастает [4]. В совокупности с большой мощностью радиосигнала от каждого узла, это привело бы к полной деградации работоспособности системы в целом. Очевидно, что необходимо применять другой подход к обеспечению требуемой зоны информирования, такой как последовательная ретрансляция сообщений. Причем допустимое количество ретрансляций должно быть строго ограничено в целях избегания ситуации широковещательного шторма.

Применение подхода с многошаговой ретрансляцией влечет за собой рост нагрузки на сеть. Это обусловлено необходимостью обработки сообщений, генерируемых соседями, с последующей ретрансляцией их в сеть.

Подобный подход позволяет решить проблему необходимости распространения информационных сообщений на требуемое расстояние, но приводит к появлению на входе каждого узла второго потока сообщений. Данный поток формируется узлами соседями (см. рис. 2) и равняется $\lambda_\Sigma = \mu_\Sigma = \sum_{i=1}^{N-1} \mu_i$, где N – количество узлов в зоне успешного приема радиосигнала (радиовидимости). Таким образом, схема узла с точки зрения элемента сети преобразуется к виду, приведенному на рис. 3.

Решение оптимизационной задачи минимизации избыточного широковещательного трафика, образованного потоком дублированных пакетов, потребовало применения специализированных алгоритмов, позволяющих организовать ретрансляцию сообщений не всеми узлами, а только теми, сообщения на которых обладают определенным признаком. В частности, принятие решения о необходимости дальнейшей ретрансляции производится на основе оценки значения SINR (Signal-to-Interference-plus-NoiseRatio) в момент приема каждого из пакетов. В зависимости от значения SINR для каждого пакета вычисляется время ожидания до момента предпринятия по-

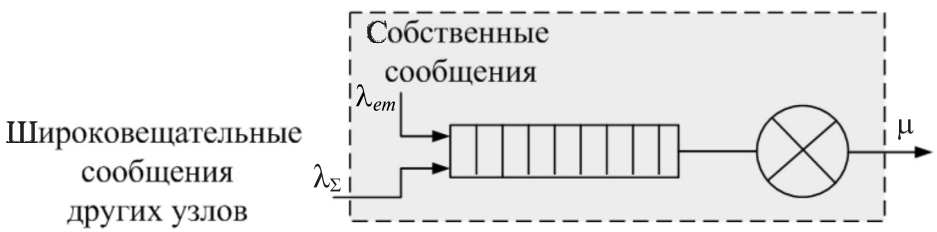

Рис. 3. Схема узла сети с многошаговой ретрансляцией сообщений

Fig. 3. Network node model with multi-hop message dissemination

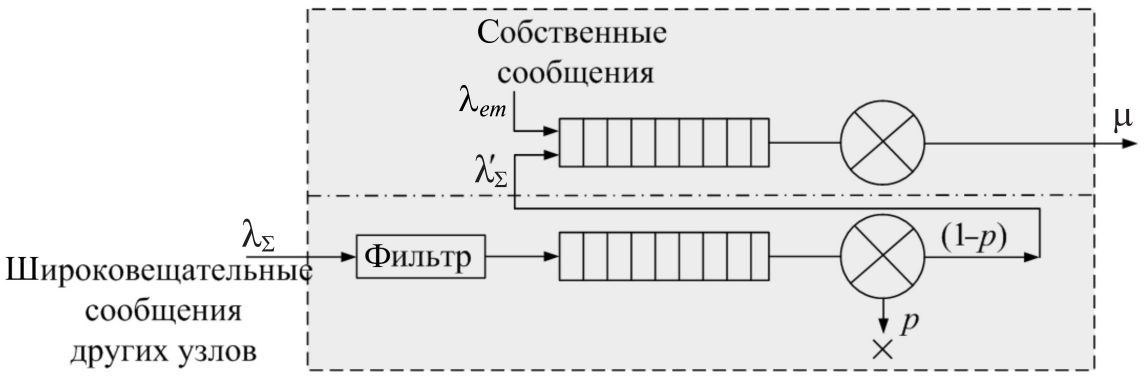

Рис. 4. Схема узла сети с многошаговой ретрансляцией сообщений и применением алгоритмов фильтрации

Fig. 4. Network node model with multi-hop message dissemination and filtering algorithms

пытки ретрансляции. Если в течение этого интервала времени принимается дублирующий пакет, то дальнейшая ретрансляция не производится, в противном случае по истечении таймера пакет отправляется на передачу.

При подобном подходе к регулированию потока сообщений суммарный входной поток, формируемый узлами в зоне успешного приема радиосигнала, можно представить как некоторый поток, подверженный фильтрации и просеиванию. После данной предварительной обработки он поступает в основную очередь обслуживания. Таким образом, схему узла сети можно привести к виду, показанному на рис. 4.

Здесь видно, что на вход основной СМО поступает два потока: поток собственных сообщений λ_{em} и поток сообщений от узлов, в зоне действия радиосигнала которых находится данный узел λ_{Σ}. Впоследствии поток λ_{Σ} проходит некоторую предварительную обработку, в результате которой часть сообщений с $TTL = TTL_{\max}$ (TimeToLive) отфильтровывается сразу. Оставшаяся часть поступает в буфер промежуточной системы принятия решений о ретрансляции, работа которого представлена в виде СМО с просеиванием. В данной системе сообщение отбрасывается с вероятностью p и с вероятностью $(1-p)$ просеивается на выход системы, формируя поток λ'_{Σ}, поступающий на вход основной СМО для дальнейшей передачи в сеть.

Описание сети

Рассмотрев основные принципы организации и структуру системы оповещения о нештатных ситуациях, важно произвести анализ вероятностных распределений потоков сообщений на входе и выходе узлов сети для оценки ее функциональных возможностей.

Пусть имеется некоторый участок городской дорожной сети. Будем считать, что на данном участке движутся транспортные средства (e_1, ..., e_K), где K – количество транспортных средств (узлов). Каждый узел транслирует в сеть информационные сообщения приложений, связанных с безопасностью дорожного движения, с установленной периодичностью, создавая потоки $\{Y_1(t), Y_2(t), ..., Y_K(t)\}$. Как было показано ранее, интенсивность потока на входе узла e_i от N узлов, находящихся в зоне радиовидимости, будет складываться из собственного потока и результирующего потока от соседних узлов. Таким образом, можно записать:

$$Y_{\Sigma}(t) = Y_i(t) + \sum_{j=1}^{N} Y_j(t), j \neq i, N \in K. \quad (1)$$

Далее предположим, что на выходе каждого узла действует простейший поток. Рассмотрим принцип формирования потока для исследуемой сети с учетом сделанного предположения. Каждый узел сети формирует собственный поток независимо от других узлов. Таким образом, имеем ряд независимых потоков, моменты появления

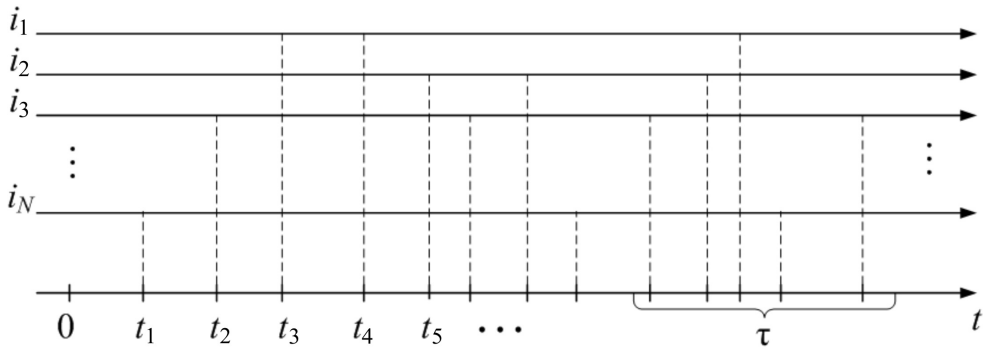

Рис. 5. Формирование суммарного потока от узлов сети

Fig. 5. The process of summary flow formation from the network nodes

сообщений в котором сводятся на одну временную ось в виду использования общей среды передачи (рис. 5).

Как известно, суммирование некоторого количества простейших потоков приводит к формированию на выходе потока с распределением по закону Пуассона. Это хорошо известное распределение позволяет оценить вероятность прихода m сообщений за временной интервал τ:

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda t}. \qquad (2)$$

Моделирование исследуемого участка дорожной сети в среде NS-2 (NetworkSimulator версия 2) показало, что суммарный поток в исследуемой сети без применения специализированных алгоритмов просеивания и с ограничением по $TTL_{\max} = 1$ распределен по закону Пуассона (рис. 6). В качестве основных параметров моделирования были установлены:

полоса пропускания 3 Мбит/с;

модель радиоканала Nakagami-m (m=7);

мощность передатчика 7,24 дБм;

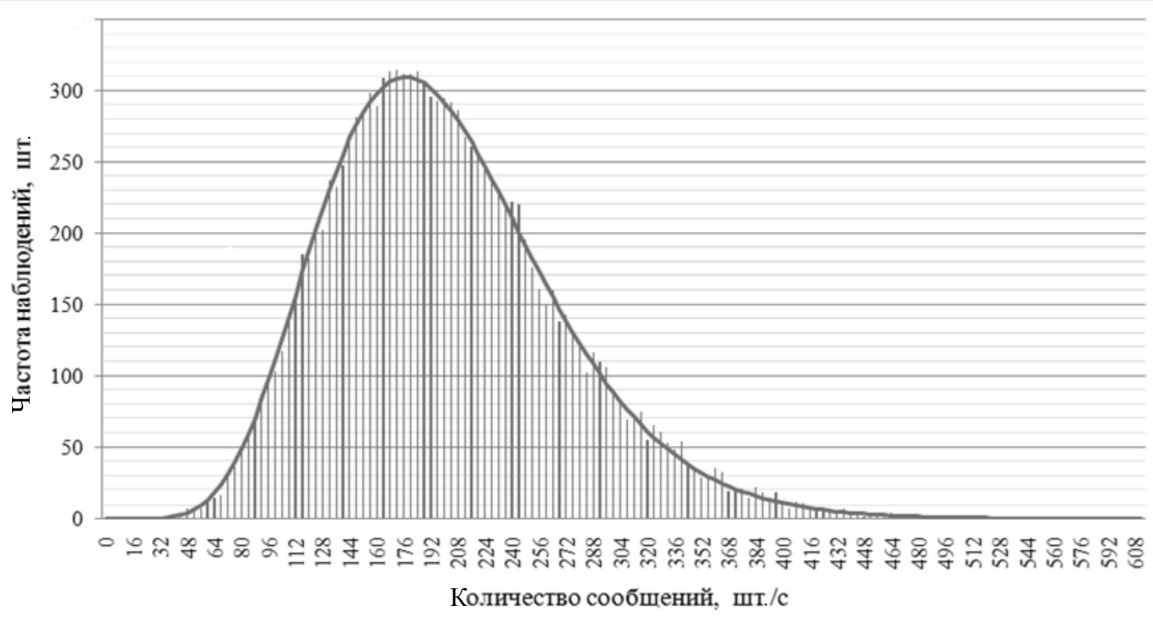

Рис. 6. Распределение числа сообщений на выходе узлов при простой широковещательной рассылке сообщений

Fig. 6. The distribution of the number of messages at the output of nodes with a simple broadcasting

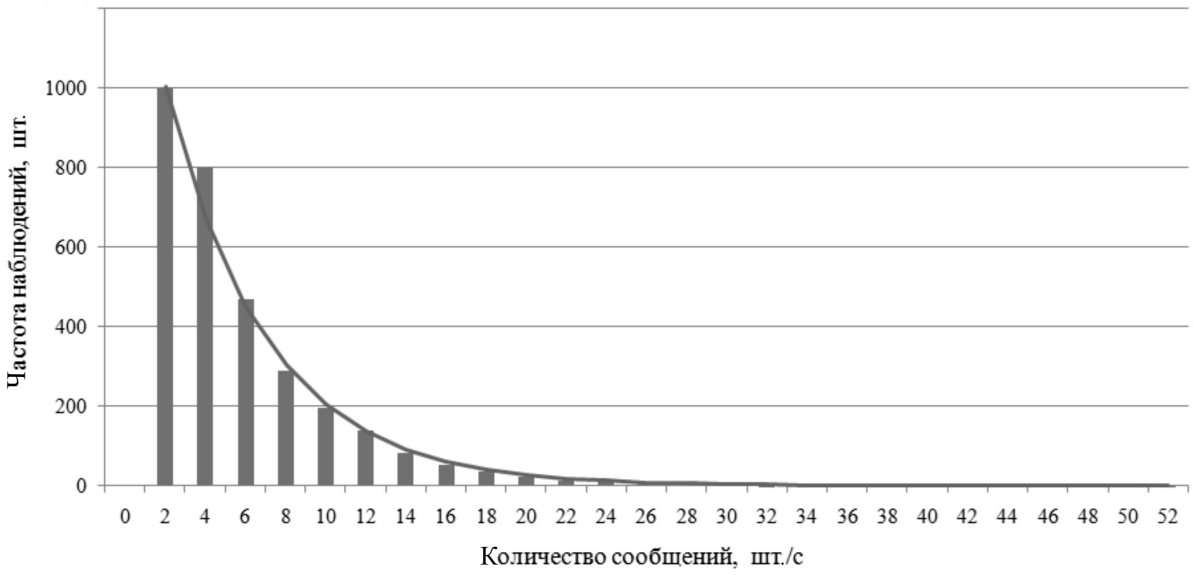

Рис. 7. Распределение числа сообщений на входе основной СМО

Fig. 7. The distribution of the number of messages at the input of the main QS

тип антенны – ненаправленная;

тип трафика – с постоянной битовой скоростью (CBR);

размер пакета 250 байт.

Как видно из графика, представленного на рис. 6, суммарный выходной поток, изображенный в виде столбчатой диаграммы, хорошо аппроксимируется теоретическим распределением Пуассона (сплошная линия), что подтверждается сравнением по критерию согласия Пирсона с уровнем значимости 0,05. Пуассоновский тип потока на выходе системы говорит о справедливости сделанного предположения о действии простейшего потока на выходах узлов. Следовательно, в случае сетевого взаимодействия в стационарном режиме, когда количество коллизий является постоянной величиной, каждый узел сети может быть представлен системой типа M/M/1.

С ростом плотности узлов, из-за применения режима многошаговых ретрансляций, суммарный поток возрастает многократно. В связи с этим возникает необходимость введения дополнительных алгоритмов просеивания потока, ограничивающих процесс ретрансляции дублирующих сообщений. Кроме этого, с целью ограничения зоны распространения широковещательной информации необходимо применить ограничение времени жизни пакетов $TTL_{max} = 3$. Данное ограничение позволяет достичь радиуса зоны информирования, перекрывающей протяженность кварталов в наиболее загруженных городских районах.

С учетом предложенного ранее алгоритма принятия решений о ретрансляции [5], необходимо более детально рассмотреть модифицированную под него схему узла (см. рис. 4).

Как было описано ранее, суммарный поток поступает на входы всех узлов, где с учетом приведенной на рис. 4 структуры проходит фильтрацию по $TTL_{max} = 3$. Данная фильтрация представляет собой стохастический процесс прореживания исходного простейшего потока. Как нам известно из учебного пособия[4], в данном случае на выходе фильтра мы получим все тот же простейший поток. При этом стоит также учесть, что фильтрация не подразумевает использование обслуживающего прибора

[4] **Вентцель Е.С., Овчаров Е.С.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: Учеб. пособие для студентов вузов. 5-е изд. М.: КНОРУС, 2016. 448 с.

основной СМО в структуре узла. Поэтому с точки зрения нагрузки на основной обслуживающий прибор, данный поток не оказывает никакого воздействия. Как результат, больший интерес представляет поток после прохождения фильтра. Его исследования показали, что данный поток является простейшим и подчиняется показательному распределению (рис. 7).

Далее фильтрованный поток поступает на вход некой промежуточной СМО, которая в соответствии с определенным стохастическим алгоритмом либо отбрасывает сообщение, либо передает в основную очередь на обслуживание. Подобный процесс обработки называется просеиванием входящего потока [6–8]. Анализ систем методом просеянного потока позволяет получить представление о характеристиках потока, поступающего в основную очередь обслуживания.

Рассмотрим процесс обслуживания потока сообщений узлом i нашей сети. Для этого изобразим две временных оси, на первой из которых отметим моменты поступления сообщений входящего потока (рис. 8). На вторую ось проецируется просеянный поток сообщений.

Зафиксируем некоторый момент времени T. Сообщения, поступившие в систему на промежутке времени $t_0 < t < T$, с вероятностью $S(t)$ будут переданы для дальнейшего обслуживания в основную очередь узла. Обозначим через $S_0(t)$ вероятность того, что сообщение не будет просеяно и на момент времени T прекратит свое обслуживание в системе. Очевидно, что для любого $t < T$ справедливо равенство:

$$S_0(t) = 1 - S(t). \quad (3)$$

Учитывая, что входящий поток, как было показано ранее, является простейшим с параметром $\lambda(t)$, то просеянный поток будет также простейшим и иметь показательное распределение с параметром:

$$\lambda_1(t) = \lambda(t)S(T - t_0). \quad (4)$$

Попадая в основную очередь обслуживания, данный поток суммируется с потоком собственных сообщений, формируя общий поток с параметром:

$$\lambda_\Sigma(t) = \lambda_{em}(t) + \lambda(t)S(T - t_0). \quad (5)$$

Общее распределение числа заявок при суммировании просеянного потока с детерминированным потоком собственных сообщений остается неизменным, следовательно, поток, поступающий в основную очередь узла, является пуассоновским с параметром:

$$\Lambda_\Sigma(0, T) = \int_0^T (\lambda_{em}(t) + \lambda(t)S(T - x))dx. \quad (6)$$

Нетрудно понять, что с учетом оптимизационной задачи и того, что $\lambda_\Sigma >> \lambda_{em}$, основное влияние на загрузку узла будет оказывать суммарный входящий поток от соседних узлов. Таким образом, применение различных механизмов его фильтрации, задающее вероятность просеивания потока $S(t)$, будет основополагающим фактором, влияющим на загрузку буфера.

Поскольку входящий поток в основную очередь узла является пуассоновским, мы можем применить теорему Бёрка, согласно которой в стационарном режиме промежутки времени между уходящими требованиями в системе M/M/1 распределены по показательному закону, так же как и промежутки между входящими требованиями, причем с одним и тем же параметром λ, определенным в (6).

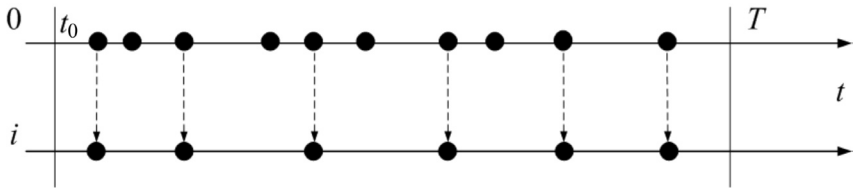

Рис. 8. Просеивание входного потока механизмом фильтрации

Fig. 8. Filtering of the input flow mechanism

Важное условие применения такого подхода – стационарный режим работы системы, когда вероятность $P_k(t)$ того, что длина очереди равна k не зависит от t. Как нам известно из теории очередей, стационарный режим устанавливается при соблюдении условия $\lambda < \mu$, то есть когда коэффициент использования системы определяется как $\rho = \lambda / \mu < 1$. При этом вероятность $P_k(t)$ определяется формулой:

$$P_k(t) = \rho^k(1-\rho), k \geq 1. \quad (7)$$

С выхода первого узла поток сообщений попадает на вход следующей системы обслуживания, где подвергается той же самой обработке, что и на первом узле. За счет становления стационарного состояния на последующих узлах процесс обслуживания повторяется, пока у сообщения не истечет *TTL*, и не прекратится его дальнейшая ретрансляция.

Анализ статистики, полученной в ходе моделированиясети VANET с работающим алгоритмом фильтрации широковещательного трафика, подтвердил принадлежность суммарного выходного потока распределению Пуассона (рис. 9, сплошная линия) с уровнем значимости 0,05 по критерию Пирсона.

Важная особенность сетей на основе технологии CSMA/CA – волатильность дисциплины обслуживания в зависимости от загрузки системы в целом. Добавление условия необходимости ретрансляции сообщений на 3 hop приводит к повышению загрузки канала трафиком от узлов зоны расширения кластера информационного обмена. С ростом количества узлов, находящихся в зоне данного кластера, возрастает объем суммарного трафика. Это приводит к увеличению вероятности возникновения коллизий и повторных срабатываний таймера отсрочки. Все эти факторы приводят к выходу системы из стационарного режима, что значительно усложняет процесс ее анализа.

Исследование сети с применением алгоритма фильтрации показало, что с ростом числа активных узлов и, соответственно, загрузки канала, суммарный выходной поток приобретает вид гамма-распределения (рис. 10).

Таким образом, мы получили результат, говорящий о том, что суммарный поток имеет распределение, описываемое функцией:

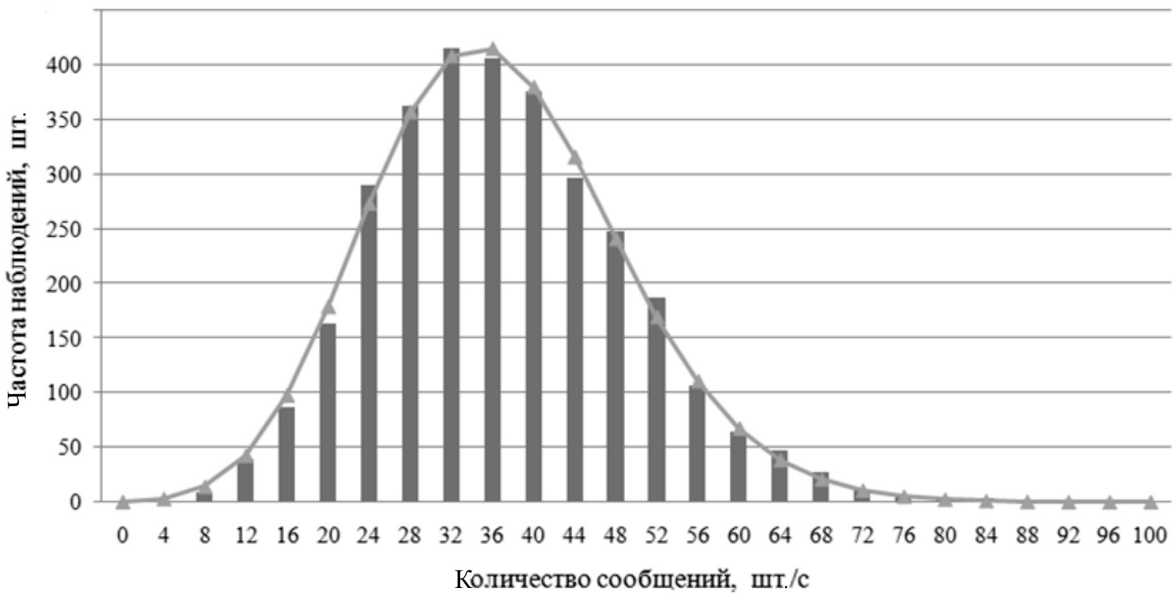

Рис. 9. Распределение числа сообщений при использовании алгоритма фильтрации

Fig. 9. The distribution of the number of messages in the case of applying filtering algorithm

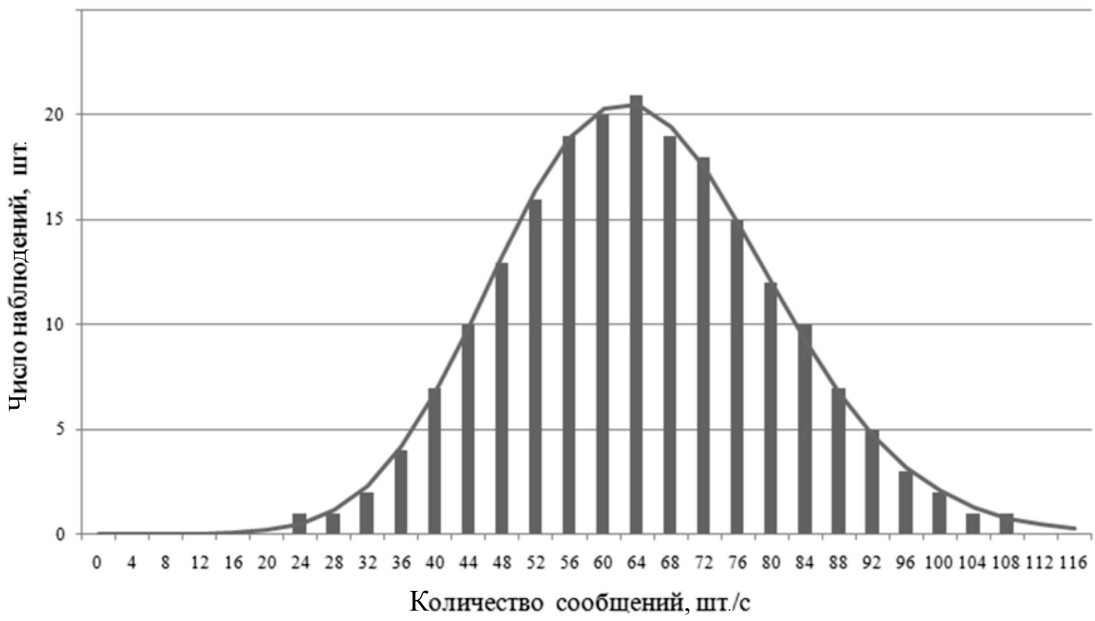

Рис. 10. Распределение числа сообщений на выходе узлов в случае применения алгоритма фильтрации

Fig. 10. The distribution of the number of messages at the output of nodes in the case of applying the filtering algorithm

$$P(x) = \begin{cases} \dfrac{\lambda[\lambda(x-\mu)]^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} e^{-\lambda(x-\mu)}, \ \forall x \in [0,\infty) \\ 0, \ \forall x < 0 \end{cases}, \quad (8)$$

где $\Gamma(\nu)$ – гамма-функция Эйлера; ν – параметр формы; x – интенсивность потока сообщений.

Как показали исследования в области влияния количества активных узлов в зоне слышимости сигнала, для описанного ранее сценария с ограничением ретранслирующих узлов максимальная производительность системы достигается при количестве узлов от 45 до 50 (рис. 11). Дальнейший рост числа узлов и требований на обслуживание приводит к резкому падению производительности сети. Этот эффект проявляется вследствие непроизводительного использования временных ресурсов канала. При этом большая часть времени тратится на коллизии и работу механизма отсрочки.

В целях сохранения работоспособности системы, при увеличении количества узлов необходимо сократить частоту генерации информационных сообщений. Так, при уменьшении интенсивности до $\lambda_{em} = 5$, с учетом скоростного режима в населенных пунктах, деградации основного функционала системы безопасности не произойдет. Однако это позволит существенно повысить устойчивость системы к перегрузкам.

К дополнительным подходам к сокращению объема широковещательного трафика, которые можно использовать совместно с предложенным ранее алгоритмом, относится возможность фильтрации по типу сообщений. Типизация сообщений и их структура приведены в стандарте SAE J2735, описывающем предназначенную для этого технологию DSRC[5]. Анализируя степень актуальности информации в зависимости от удаления от источника, большую часть категорий сообщений можно замкнуть в зоне прямой слышимости сигнала, которая составляет 100–130 м. Принимая во внимание тот факт, что остановочный путь

[5] DSRC Implementation Guide // A guide to users of SAE J2735 message sets over DSRC.SAE International. 2010. Pp. 1–210.

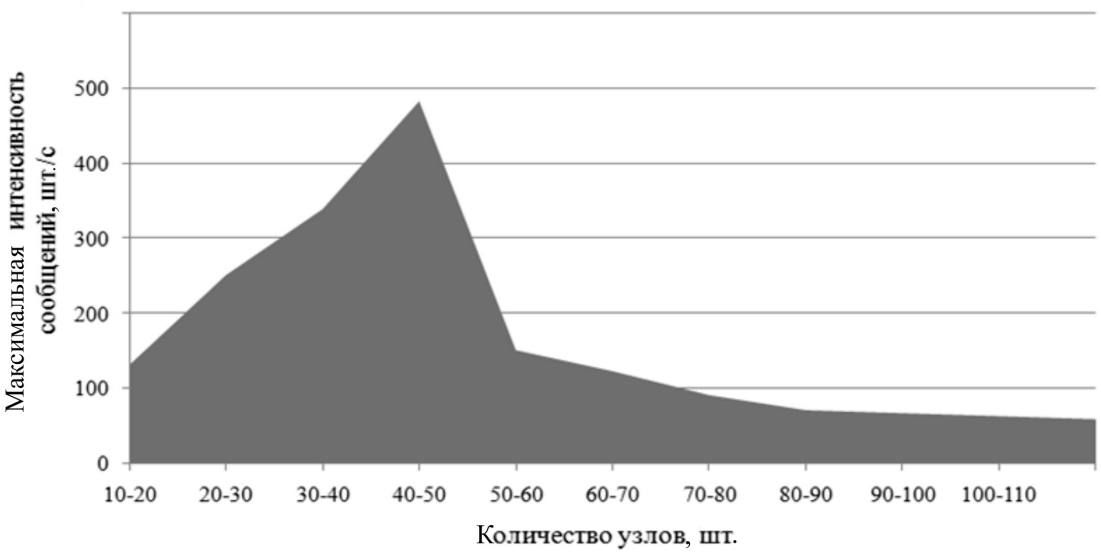

Рис. 11. Интенсивность полезной загрузки канала от плотности транспортных средств

Fig. 11. The intensity of the channel payload from the density of vehicles

с учетом принятого в городе скоростного режима, скользкого дорожного покрытия и использования сезонных покрышек не превышает 90 м [9], очевидно, что для принятия превентивных мер по предотвращению ДТП для категорий «Экстренное торможение», «Приближение аварийного ТС», «Ухудшение условий», «Совместное вождение», «Смена полосы движения» достаточно выполнить оповещение ТС в зоне прямого распространения сигнала. Такие категории как «Аварийная ситуация», «Опасность аварии», «Ситуация впереди» служат для информирования водителей о необходимости изменения маршрута движения в связи с потенциальной опасностью. С учетом протяженности городских кварталов, для принятия мер по изменению маршрута необходимо расширить зону оповещения как минимум до трех ретрансляций (см. табл.). Это обусловливается еще и тем фактом, что концепция интеллектуальных транспортных систем подразумевает установку стационарных базовых станций в первую очередь на перекрестках, для сопряжения с существующими контроллерами систем

Предлагаемая классификация сообщений безопасности

Proposed security message classification

Категория сообщений	Задержка, мс	Интенсивность, шт./с	Дистанция, *TTL*
Аварийная ситуация	<10	5–10	3
Опасность аварии	<10	5–10	3
Экстренное торможение	<10	5–10	1
Приближение аварийного ТС	10–20	2–5	1
Ситуация впереди	10–20	5–10	3
Ухудшение условий	10–20	3–5	1
Совместное вождение	~100	5–10	1
Смена полосы движения	~100	5–10	1

управления дорожным движением.

Таким образом, при передаче категорий сообщений, связанных с управлением транспортными потоками, необходимо обеспечить их доставку до ближайших базовых станций. Данный подход позволит сократить избыточный трафик из зон расширения информационного кластера до минимума.

Заключение

На основе проведенного анализа можно производить оценку функциональных возможностей и эффективности функционирования системы обеспечения безопасности на основе VANET. По результатам выработываются рекомендации к настройке режима работы сети в части установки параметров ретрансляции определенных категорий сообщений, с целью повышения эффективности использования среды передачи. При этом помимо учета требований к задержкам, описанным в стандарте, увеличивается зона информирования участников дорожного движения о возможной опасности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.». Соглашение № 14.604.21.0165, уникальный идентификатор проекта RFMEFI 60417 X 0165.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lei G., Liu F., Wang P.** Power adjustment based congestion control in vehicular Ad-Hoc networks // Proc. of the 4th Internat. Conf. on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology (ICAIET). 2014.

2. **Zemouri S., Djahel S., Murphy J.** Smart adaptation of beacons transmission rate and power for enhanced vehicular awareness in VANETs // Proc. of the IEEE 17th Internat. Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Oct. 2014. Pp. 739–746.

3. **Jafer M., Khan M.A., Rehman S.U., Zia T.A.** Broadcasting under highway environment in VANETs using genetic algorithm // In IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2017. Pp. 1–5.

4. **Aygun B., Boban M., Wyglinski A.M.** ECPR: Environment and context-aware combined power and rate distributed congestion control for vehicular communications // Computer Communications. 2016. No. 93. Pp. 3–16.

5. **Ярцев С.В.** Механизмы управления широковещательным трафиком в сетях VANET // Электросвязь. 2015. № 3. С. 27–31.

6. **Андронов А.М.** Анализ нестационарной бесконечнолинейной системы массового обслуживания как сети случайного доступа // Автоматика и вычислительная техника. 1994. № 1. С. 28–33.

7. **Назаров А.А., Семенова И.А.** Асимптотический анализ систем массового обслуживания с неограниченным числом приборов и полумарковским входящим потоком // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 5. С. 12–17.

8. **Куликова О., Назаров А.** Исследование бесконечнолинейных систем массового обслуживания методом просеивания входящего потока. Минск: БГУ, 2005. С. 98–102

9. Тест шипы и липучки на льду: Казус градуса // URL: https://www.zr.ru/content/articles/16906-test_shipy_i_lipuchki_na_ldu_kazus_gradusa/ (Дата обращения: 04.08.2018).

Статья поступила в редакцию 07.07.2018.

REFERENCES

1. **Lei G., Liu F., Wang P.** Power adjustment based congestion control in vehicular Ad-Hoc networks. *Proc. of the 4th International Conference on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology (ICAIET), 2014.*

2. **Zemouri S., Djahel S., Murphy J.** Smart adaptation of beacons transmission rate and power for enhanced vehicular awareness in vanets. *Proc. of the IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Oct. 2014, Pp. 739–746.

3. **Jafer M., Khan M.A., Rehman S.U., Zia T.A.** Broadcasting under highway environment in VANETs using genetic algorithm. *In IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2017, Pp. 1–5.

4. **Aygun B., Boban M., Wyglinski A.M.** ECPR: Environment-and context-aware combined power and rate distributed congestion control for vehicular communications. *Computer Communications*, 2016, No. 93, Pp. 3–16.

5. **Yartsev S.V.** Mekhanizm yupravleniya

shirokoveshchatelnym trafikom v setyakh VANET [Mechanisms for managing broadcast traffic in VANET]. *Elektrosvyaz*, 2015, No. 3, Pp. 27–31. (rus)

6. **Andronov A.M.** Analiz nestatsionarnoy beskonechnolineynoy sistemy massovogo obsluzhivaniya kak seti sluchaynogo dostupa. *Avtomatika i vychislitelnaya tekhnika*, 1994, No. 1, Pp. 28–33. (rus)

7. **Nazarov A.A., Semenova I.A.** Asimptoticheskiy analiz sistem massovogo obsluzhivaniya s neogranichennym chislom priborov i polumarkovskim vkhodyashchim potokom [Asymptotical analysis of queuing system with unlimited number of instruments and semarkovsky incoming flow]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, Vol. 320, No. 5, Pp. 12–17. (rus)

8. **Kulikova O., Nazarov A.** *Issledovaniye beskonechnolineynykh sistem massovogo obsluzhivaniya metodom proseivaniya vkhodyashchego potoka* [*Investigation of endless-line queuing systems by the method of sifting the incoming flow*]. Minsk, BGU Publ., 2005, Pp. 98–102. (rus)

9. The test of studded tires and the friction of tires on ice: The incidence of a degree. Available: *https://www.zr.ru/content/articles/16906-test_shipy_i_lipuchki_na_ldu_kazus_gradusa/* (Accessed: 04.08.2018). (rus)

Received 07.07.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЯРЦЕВ Сергей Викторович
YARTSEV Sergey V.
E-mail: s.yartsev@gmail.com

КУЧЕРЯВЫЙ Евгений Андреевич
KUCHERYAVY Yevgeni A.
E-mail: ykoucheryavy@hse.ru

ВЛАДЫКО Андрей Геннадьевич
VLADYKO Andrei G.
E-mail: vladyko@sut.ru

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

DOI: 10.18721/JCSTCS.11302
УДК 004.896

СИСТЕМА СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПЛОХО ФОРМАЛИЗУЕМЫХ СЦЕНАРИЕВ ДИНАМИЧЕСКИХ СЦЕН

А.В. Федоров, В.П. Шкодырев, Н.Д. Барсуков

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

Рассмотрена система прогнозирования аварийных и предаварийных ситуаций при вождении транспортного средства с использованием модели IDAS (интеллектуальная система помощи водителю). Система IDAS основана на комбинации длинной и кратковременной памяти (через рекуррентную нейронную сеть) и быстро реагирующей системы на базе контроллера нечеткой логики. Оценена эффективность комбинации нейро-нечеткого контроллера и рекуррентной нейронной сети. Разработаны алгоритм прогнозирования аварийных ситуаций и программное обеспечение для тестирования модели на видеозаписях с видеорегистраторов. Созданная модель позволяет определить аварийную ситуацию не менее чем за секунду до ее начала. Эффективность представленного подхода основана на данных с камер видеорегистраторов. В качестве тестовых данных использовано 1730 видеозаписей лаборатории VSLab с видеорегистраторов в Тайване. Создан мобильный прототип системы прогноза аварийных ситуаций на базе мини-компьютера Raspberry Pi 3.

Ключевые слова: машинное зрение, искусственный интеллект, глубокое обучение, нейронные сети, кластеризация, рекуррентные нейронные сети.

Ссылка при цитировании: Федоров А.В., Шкодырев В.П., Барсуков Н.Д. Система ситуационного управления и контроля плохо формализуемых сценариев динамических сцен // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 3. С. 20–28. DOI: 10.18721/JCSTCS.11302

SYSTEM FOR SITUATION MANAGEMENT AND CONTROL OF BAD FORMALIZED SCENARIOS OF DYNAMIC SCENES

A.V. Fedorov, V.P. Shkodyrev, N.D. Barsukov

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

The article considers a system for forecasting emergency situations when driving a vehicle using the IDAS (intelligent driver assistance system) model. The IDAS system is based on a combination of long and short-term memory (via recurrent neural network) and a fast-reacting system based on a fuzzy logic controller. We have evaluated the efficiency of combining a neuro-fuzzy controller and a recurrent neural network. We have developed an algorithm for forecasting emergencies, as well as software for testing the model on video recordings from DVRs. The effectiveness of the proposed approach has been proved on data from dash-cameras. The final time before the accident is near one second before any type of road accident. We have created a mobile prototype for the system for forecasting emergency situations based on the Raspberry Pi 3 mini-computer.

Keywords: machine vision, artificial intelligence, deep learning, neural networks, clusterization, recourse neural networks.

Citation: Fedorov A.V., Shkodyrev V.P., Barsukov N.D. System for situation management and control of bad formalized scenarios of dynamic scenes. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 3, Pp. 20–28. DOI: 10.18721/JCSTCS.11302

Введение

Данное исследование сосредоточено на создании системы предсказания аварийных ситуаций при управлении транспортным средством; основное назначение разработки – вернуть транспортное средство в исходное, нормальное состояние, при возникновении штатных и нештатных ситуаций, повседневно возникающих на дороге при вождении транспортных средств. Главный критерий управления такими системами – снижение неопределенностей в системе управления. Несмотря на большой скачок в развитии современных технологий и алгоритмов искусственного интеллекта, даже автономные транспортные средства Google'sself-drivingcar и Tesla все еще попадают в аварии, где в большинстве случаев виноваты другие участники дорожного движения [1]. Кроме того, по статистике только в США каждый день погибает порядка 90 человек в результате ДТП [2]. Для того чтобы избежать этих несчастных случаев предлагается способ для определения на основе данных с автомобильных видеорегистраторов предаварийных ситуаций и предоставления водителю предупреждающего сигнала за несколько секунд до возникновения аварии.

Цель исследования – разработка и изучение системы контроля дорожной ситуации на основе гибридной модели нейронной сети с применением алгоритма глубокого обучения для распознавания и прогнозирования плохо структурированных потоковых событий в условиях неопределенности при вождении транспортного средства.

Нейросетевая адаптивная система прогнозирования нештатных ситуаций

Для построения алгоритма поиска нештатных ситуаций взято исследование [3]. Входными данными для алгоритма являются: описание текущей ситуации $T = \{t_1, t_2, ..., t_n\}$, включающее n значений параметров, характеризующих проблему абонента; BC – непустое множество НС; $W = \{w_1, w_2, \ldots, w_n\}$ – веса или коэффициенты важности параметров; M – количество рассматриваемых НС из БЗНС; K – пороговое значение степени сходства. Выходные данные: множество НС SC, которые имеют степень сходства больше (или равную) порогового значения K.

Суть поиска схожей нештатной ситуации заключается в определении дистанции параметров текущей ситуации с параметрами ситуаций, заложенных в базу знаний, умноженных на вес, определяющий значимость данного признака:

$$D(T, C_j) = \sqrt{\sum_{i=1}(w_i(x_i^{C_j} - x_i^T))^2}. \qquad (1)$$

После определения схожести параметров определяется максимально приближенная ситуация. Если при этом степень схожести будет ниже порогового значения, то данная ситуация будет считаться новой:

$$S(Cj, T) = (1 - D_{C_jT} / D_{MAX}) * 100\ \%. \qquad (2)$$

Если текущая ситуация не подходит ни под одно описание НС, то текущая ситуация передается на вход нейро-нечеткого модуля (механизм работы алгоритма приведен на рис. 1). Нейро-нечеткий модуль реализован на основе нейросети NNFLC (Neurons Network Fuzzy Logic Controller) или ННК (нейро-нечеткий контроллер).

NNFLC – нечеткий контроллер на основе НС. Структурно NNFLC – это многослойная сеть прямого распространения сигнала, реализующая принципы нейросетевой базы знаний, причем различные слои выполняют разные функции. Система NNFLC позволяет представить нечеткие продукционные системы классификации типа Max-Min или типа Takagi-Sugeno в форме ИНС. При проектировании возни-

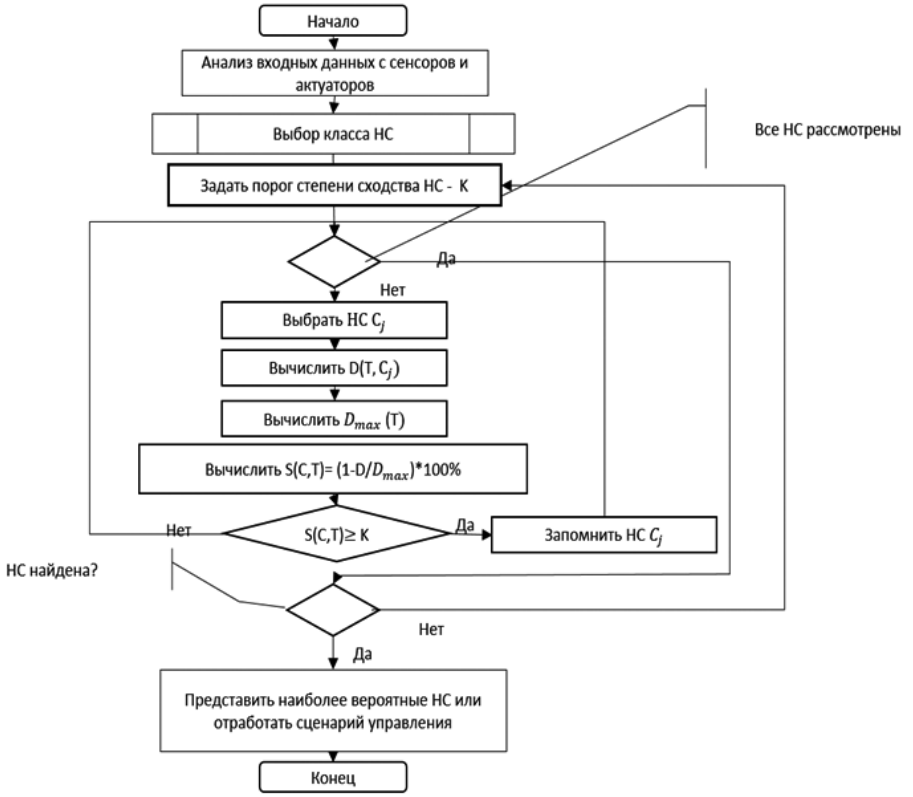

Рис. 1. Алгоритм поиска нештатной ситуации

Fig. 1. The alarms search algorithm

кает четырехслойная нечеткая FF-сеть, в которой каждый слой образуется нейронами определенного типа. Веса связей либо постоянны, либо варьируемы в процессе обучения. Путем использования различных алгоритмов обучения могут варьироваться как свободные параметры, так и структура нейросети, причем в реальном времени.

Модель NNFLC выглядит следующим образом.

Слой 1 (входные термы):

$$y_i^{(1)}(x) = \exp\left[-\frac{(x_i - c_i)^2}{2} * \sigma_i^2\right]. \qquad (3)$$

Слой 1 представляет собой функции принадлежности, которые реализованы как радиальные базисные нейроны.

Слой 2 (правила):

$$y_i^{(2)} = \min\left[y_1^{(1)}, ..., y_n^{(1)}\right]. \qquad (4)$$

Слой 2 моделирует И–условия правил.

Слой 3 (выходные термы):

$$y_i^{(3)} = \max\left[y_1^{(1)}, ..., y_n^{(1)}\right]. \qquad (5)$$

Слой 3 представляет собой ИЛИ–комбинацию правил. В режиме обучения данный слой перенастраивает параметры функций принадлежности выходных переменных, а в рабочем режиме формирует значение выхода.

Слой 4 (выход).

В рабочем режиме нейроны выполняют дефаззификацию:

$$z_i^{(4)} = \sum_j w_{ji} * y_i^{(3)} * \frac{w_{ij}}{\sum_j w_{ji}}, \qquad (6)$$

а в режиме обучения это дополнительный вход, позволяющий настроить функцию принадлежности выходной переменной.

Структура АС NNFLC инициализируется по принципу формирования полной матрицы правил:

$$T = \Pi_{i=1}^{n} \tau(x_i). \qquad (7)$$

В ходе исследования разработано

математико-программное обеспечение нейросетевой БЗ. Описана разработанная библиотека программ – правил принятия решений. Программа разработана в трех вариантах. Первый вариант работает с промышленными контроллерами (например, с химической станцией) и умеет определять нештатные ситуации в зависимости от данных с датчиков. Вторая версия программы разрабатывалась для определения нештатных ситуаций на дороге, разработка велась на языке Java. Программа умеет определять подключаемое видеоустройство и применять алгоритм обнаружения объектов и их классификации с последующим определением нештатной ситуации и выводом действия, которое нужно предпринять водителю. Третья версия программы включает в себя адаптацию под микрокомпьютер Raspberry Pi 3B, а стандартная модель Tensorflow была дополнена собственноручно обученной нейронной сетью на основе 1730 видеозаписей лаборатории VSLab с видеорегистраторов в Тайване. Пример работы программы приведен на рис. 2.

Сначала определяется наличие двигающихся объектов и выделяется область вокруг них при помощи алгоритма SURF и DBSCAN, далее RNN определяет, к чему относится данный объект, и при помощи NNFLC определяется тип нештатной ситуации и вывод принимаемого решения.

Рекурсивная нейронная сеть была реализована при помощи LSTM-ячеек. Идея использовать LSTM-ячейки для прогнозирования аварий встречается в публикациях [7, 8]. В работе [7] исследована зависимость аварий от внешней среды, например от погодных условий, а в [8] предпринята попытка предугадать маневр водителя за несколько секунд до его выполнения. Цель нейронной сети состоит в том, чтобы как можно раньше предсказать будущую аварию с учетом наблюдений $(x_1, x_2, ..., x_t) \mid t < y$ до того, как авария произойдет в кадре y. T – количество фреймов на видео, y_j – маркер аварии для v_j видео. Стандартная RNN – это особый тип сети, принимающий последовательность наблюдений $(x_1, x_2, ..., x_t)$ в качестве входных данных и

Рис. 2. Принцип работы алгоритма в течение времени

Fig. 2. Algorithm's principle of operation over time

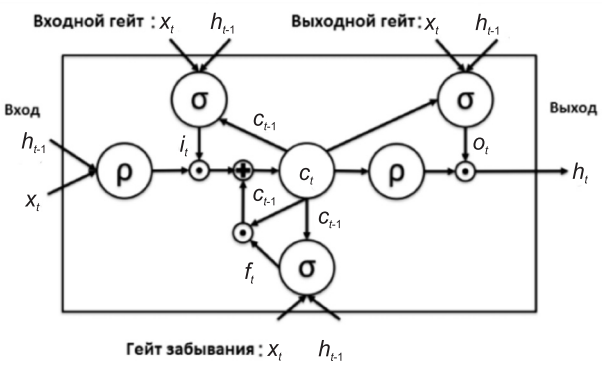

Рис. 3. Модель LSTM:
входной гейт *i*, гейт забывания *f* и выходной гейт *o*, *h* – скрытое представление, *c* – ячейка памяти

Fig. 3. LSTM model:
the input gate *i*, the forgetting gate *f* and output gate *o*, *h* – are a hidden representation, *c* – is a memory cell

выводящий последовательность изученных скрытых представлений $(h_1, h_2, ..., h_t)$, где h_t кодирует наблюдения последовательности $(x_1, x_2, ..., x_t)$. Определение опасного объекта на изображении ведется при помощи алгоритма SURF и метода кластеризации DBSCAN. Основной недостаток данного подхода – большая сложность в определении границ объекта. Возможным решением этой проблемы является применение Non-Maximum Suppression (NMS) Object Detection, как описано в статье [9].

Скрытое представление с LSTM генерируется рекурсивным уравнением:

$$(h_t, c_t) = \text{LSTM}(x_t, h_{t-1}, c_t). \quad (8)$$

Принцип работы LSTM-ячейки показан на рис. 3. На рисунке обозначено входной вектор x_t во время *t*, h_t – вектор скрытого состояния во время *t*, W_t – матрица весов, применяющаяся к входу, W_h – матрица весов в рекуррентных соединениях, *b* – вектор свободных членов.

На каждом входе x_t, имея скрытое представление h_{t-1} и состояние ячейки c_{t-1}, последовательно вычисляются:

$$\begin{aligned} c_t^{'} &= \tanh(W_{xc}x_t + W_{hc}h_{t-1} + b_{c'}), \\ i_t &= \text{y}\,(W_{xi}x_t + W_{hi}h_{t-1} + b_i), \\ f_t &= \text{y}\,(W_{xf}x_t + W_{hf}h_{t-1} + b_f), \\ o_t &= \text{y}\,(W_{xo}x_t + W_{ho}h_{t-1} + b_o), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} c_t &= f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot c'_t, \\ h_t &= o_t \odot \tanh(c_t), \end{aligned} \quad (9)$$

где $c_t^{'}$ и c_t – ячейки памяти, i_t – входной гейт, f_t – забывающий гейт, o_t – выходной гейт. Принцип построения и объединения LSTM-ячеек в нейронной сети аналогичен описанной модели в [10]. Таким образом, оптимальное количество ячеек было выбрано равным 512. Подробно механика работы LSTM изложена авторами в [11].

Оценка эффективности ННК

Оценка эффективности ННК (нейронечеткого контроллера) проводилась по таким критериям, как точность, скорость обучения, количество обрабатываемых правил, скорость принятия решений. Тестирование системы производилось на ПК с процессором Corei7 и 16 Гб оперативной памяти. Тестирование проводилось в программной среде Matlab, также для сравнения были реализованы на языке Java нейросети NNFLC и ANFIS.

Для тестирования была создана модель химической станции, в которой одновременно обрабатывались данные с 45 сенсоров и актуаторов. Моделирование НС ANFIS также проводилось в Toolbox Matlab. Система базы правил первоначально была разработана на основе модифицированного ANFIS-метода, реализованного в базовом пакете программ Matlab. ANFIS показал свою несостоятельность при масштабировании модели, т. к. при количестве параметров больше 70 расчеты было невозможно проводить из-за закрытия программы Matlab. Основные отличия состоят в том, что в Matlab можно задать ограниченное число правил, при превышении числа правил система не справляется с нагрузкой. Проблема ANFIS toolbox состоит в том, что для семи термов и всех сочетаний правил система выполняет переобучение за длительный период времени. Например, для 6804 правил время обучения модели занимает 6 мин на современной машине ЭВМ, что неприемлемо для подобного рода проблем с таким небольшим набором данных. Для более быстрого обучения использовались нейро-нечеткие системы на языке

программирования Java и Python, которые можно легко конфигурировать и обучать [5, 6].

Оценка эффективности гибридной НС на основе ННК и РНС

При обучении модели РНС (рекуррентной нейронной сети) были применены и выведены эмпирическим путем следующие параметры.

1. Параметры алгоритма обучения:

- коэффициент скорости обучения (learningrate) – 0,0001;
- количество «эпох» (циклов) – 30;
- размер батч-пакета (–size) для батч-нормализации – 10.

2. Параметры сети:

- входное количество параметров – 4096;
- количество объектов для каждого изображения (включая функции изображения) – 20;
- количество скрытых слоев LSTM (длительная краткосрочная память) – 512;
- встроенные особенности изображения – 256;
- встроенные особенности объектов – 256;
- количество классов (есть аварийная ситуация или нет) – 2;
- количество кадров в каждом видео – 100.

На основе данных параметров, а также 1730 видеозаписей были проведены обучение и тестирование нейронной сети. Процесс обучения на ПК с Corei7 2,8 ГГц и 30 Гб оперативной памяти занял 8 ч.

Подготовив модель, необходимо адекватно оценить ее качество. Для этого введены следующие понятия:

- TP (True Positive) – истинно-положительный. Классификатор решил, что авария произойдет, и она произошла.
- FP (False Positive) – ложноположи-

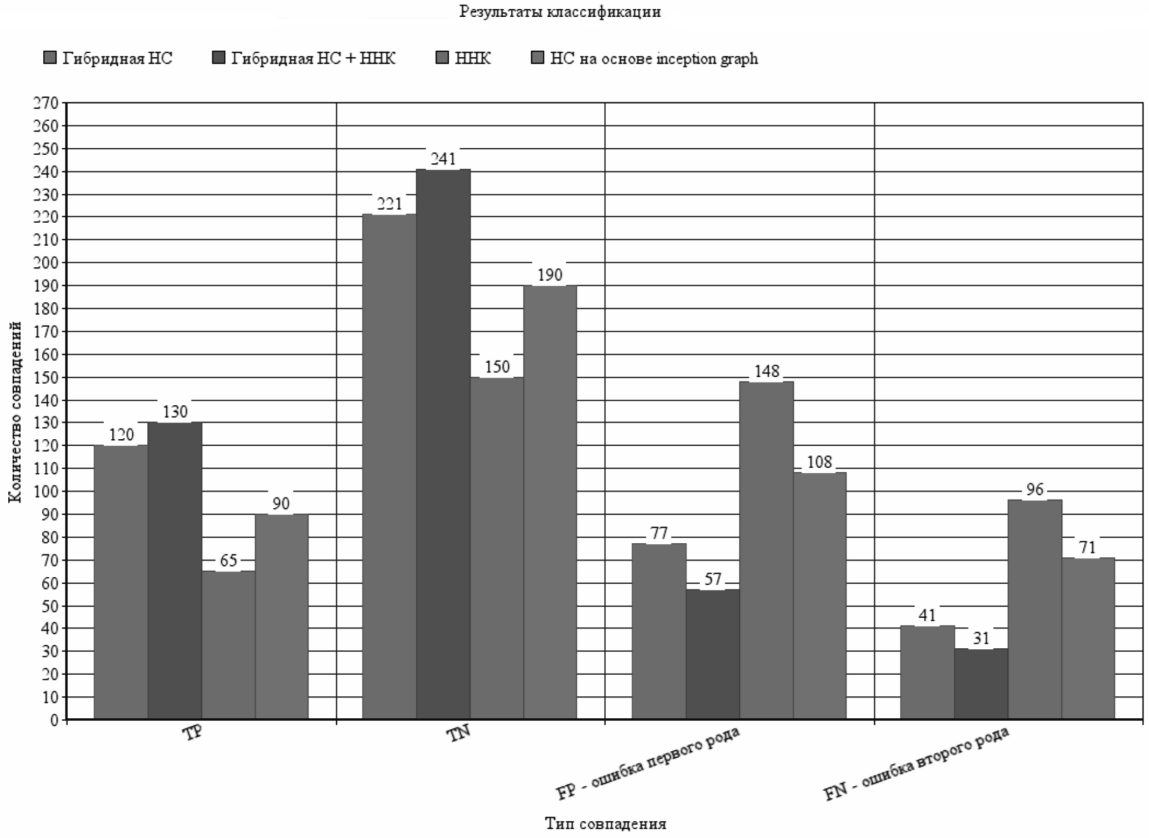

Рис. 4. Сравнение результатов классификации разных моделей

Fig. 4. Comparison of classification results for different models

тельный. Классификатор решил, что авария произойдет, но она не произошла. Это т. н. ошибка первого рода. Она не так страшна, как ошибка второго рода.

$$\alpha = \mathbb{P}\{T \in \Omega_\alpha | \ H_0\}. \qquad (10)$$

• TN (True Negative) – истинно-отрицательный. Классификатор решил, что авария не произойдет, и она произошла.

$$\beta(H_1) = \mathbb{P}\{T \notin \Omega_\alpha | H_1\}, \qquad (11)$$

где Ω_α – критическое множество наименее вероятных значений T; H_0 – нулевая гипотеза; H_1 – альтернативная гипотеза (не H_0).

Сравнение результатов классификации разных моделей показано на рис. 4.

Таким образом, получились следующие результаты:

	TP	TN	FP(α)	FN(β)
Гибридная НС	120	221	77	41
Гибридная НС + ННК	130	241	57	31
ННК	65	150	148	96
НС + inception graph	90	190	108	71

Как мы видим, гибридная НС в связке с NNFLC имеет наилучшие результаты: ошибка второго рода в три раза меньше, чем в случае обычной модели на основе NNFLC, и более чем в два раза лучше, чем нейронная сеть на основе стандартной модели для определения автомобилей.

Основные научные и практические результаты

Обучение и тестирование модели гибридной сети проводилось на основе записей с видеорегистраторов от компании VSLab в Тайване, всего было предоставлено 1730 записей по сто кадров в каждом с разрешением 720 p [4]. Данный набор видеозаписей и послужил данными для апробации модели.

На рис. 5 приведены графики, полученные в результате тренировки модели и тестового прогона на основе тестовой выборки. Первый график показывает зависимость Precisionv.s. Recall (PR). Второй график показывает среднее время до момента аварии Time-to-Accident для различной полноты Recall (ToAR). Как видно из графика, метод способен в среднем предсказывать аварию за 0,38 с до того момента, когда она произойдет, с вероятностью равной 0,62 и 80 % полнотой (отношение верно угаданных объектов класса ко всем представителям этого класса).

В ходе работы над проектом разработан прототип мобильной системы на основе обученной модели гибридной сети вместе с ННЛК (рис. 6). В роли вычислительной машины выступает мини-компьютер Raspberry Pi 3 с 1 Гб оперативной памяти и ARM-процессором 1,5 ГГц.

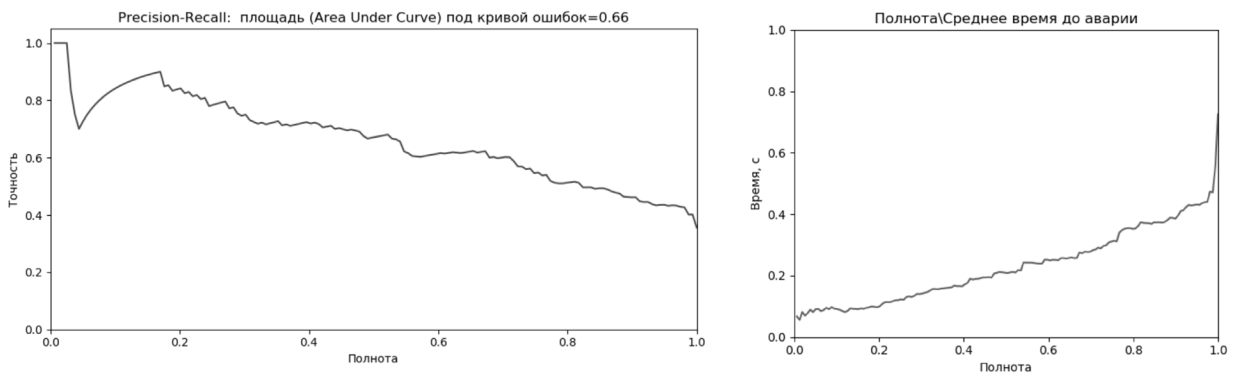

Рис. 5. График зависимости Precision v.s. Recall (PR)

Fig. 5. Dependency graph Precision v.s. Recall (PR)

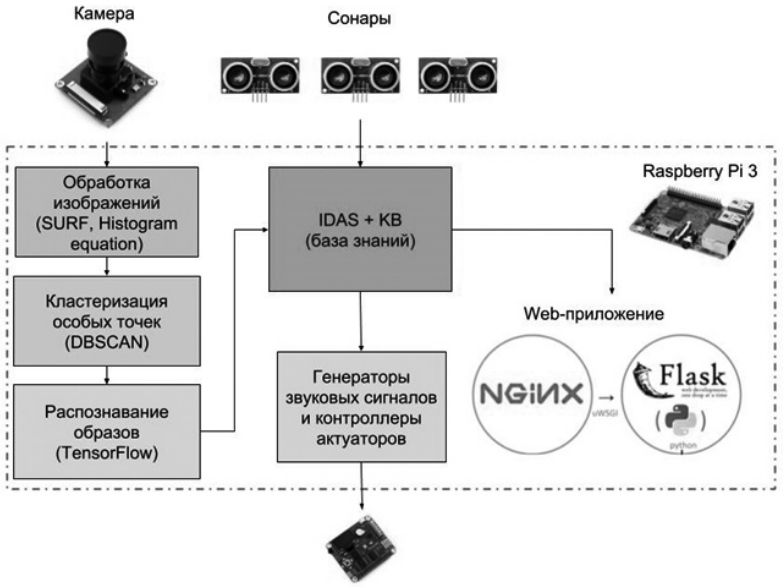

Рис. 6. Прототип мобильной системы прогноза нештатных ситуаций на основе мини-компьютера Raspberry Pi 3

Fig. 6. The prototype of a mobile system for predicting emergency situations based on the Raspberry Pi 3 mini-computer

Заключение

Разработаны программные модули обучения, тестирования и применения иерархической рекуррентной нейронной сети для предсказания аварий при помощи алгоритмов и моделей глубокого обучения. Проведено комплексное имитационное моделирование различных аварийных ситуаций на тестовых данных – видеозаписей с видеорегистраторов. Разработан прототип для считывания видеопотока и обработки на мобильном компьютере Raspberry Pi 3. Для данного исследования был подготовлен набор данных для обучения нейронной сети, состоящий из 1730 видеозаписей, и разработана система контроля дорожной ситуации на основе гибридной модели нейронной сети. Разработанная модель показала приемлемые результаты на тестовых данных, но требует большего количества данных и дальнейшего улучшения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Google Inc.: Google self-driving car project monthly report. 2015 // URL: https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/ru//selfdrivingcar/files/reports/report-0515.pdf

2. N. Highway Traffic Safety Administration: 2012 motor vehicle crashes: overview // URL: https://www.cdc.gov/vitalsigns/pdf/2016-07-vitalsigns.pdf

3. **Малыхина М.П., Бегман Ю.В.** Оценка эффективности гибридизации интеллектуальных методов на примере нейросетевой экспертной системы на основе прецедентов // Научный журнал КубГАУ. Краснодар: КубГАУ, 2013. № 86 (02). С. 253–262.

4. **Fu-Hsiang Chan, Yu-Ting Chen, Yu Xiang, Min Sun.** Anticipating Accidents in Dashcam Videos. ACCV, 2016.

5. **Fedorov A., Shkodyrev V., Zobnin S.** Knowledge based planning framework for intelligent distributed manufacturing systems // Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9141. Pp. 300–307.

6. **Fedorov A., Zobnin S., Shkodyrev V., Goloschchapov E., Potekhin V.** Fuzzy decision support in distributed v2v systems // Source: Annals of DAAAM & Proceedings. 2015. Vol. 26. Iss. 1. Pp. 0097–0103.

7. **Honglei Ren, You Song, Jingwen Wang, Yucheng Hu, Jinzhi Lei.** A deep learning approach to the citywide traffic. Accident risk prediction // arXiv: 1710.09543v2 [cs.CY]. 15 Apr. 2018.

8. **Ashesh Jain, Avi Singh, Hema S Koppula, Shane Soh, Ashutosh Saxena**. Recurrent neural networks for driver activity anticipation via sensory-

fusion architecture // arXiv: 1509.05016 [cs.CV]. 16 Sep. 2015.

9. **Navaneeth Bodla, Bharat Singh, Rama Chellappa, Larry S. Davis.** Improving object detection with one line of code // arXiv: 1704.04503v2 [cs.CV]. 8 Aug. 2017.

10. **Joe Yue-Hei Ng, Matthew Hausknecht, Sudheendra Vijayanarasimhan, Oriol Vinyals, Rajat Monga, George Toderici**. Beyond short snippets: deep networks for video classification // arXiv: 1503.08909v2 [cs.CV]. 13 Apr. 2015.

11. **Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е.** Глубокое обучение. СПб.: ИД «Питер», 2017.

Статья поступила в редакцию 23.06.2018.

REFERENCES

1. Google Inc.: Google self-driving car project monthly report. 2015. Available: *https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/ru//selfdrivingcar/files/reports/report-0515.pdf*

2. N. Highway Traffic Safety Administration: 2012 motor vehicle crashes: overview. Available: *https://www.cdc.gov/vitalsigns/pdf/2016-07-vitalsigns.pdf*

3. **Malykhina M.P., Begman Yu.V.** Evaluation of efficiency of hybridization of the intelligent methods on the example of the neural network expert system based on precedents. *Scientific Journal of KubSAU.* Krasnodar: KubGAU Publ., 2013, No. 86 (02), Pp. 253–262. (rus)

4. **Fu-Hsiang Chan, Yu-Ting Chen, Yu Xiang, Min Sun.** *Anticipating Accidents in Dashcam Videos.* ACCV, 2016.

5. **Fedorov A., Shkodyrev V., Zobnin S.** Knowledge based planning framework for intelligent distributed manufacturing systems. *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, Vol. 9141, Pp. 300–307.

6. **Fedorov A., Zobnin S., Shkodyrev V., Goloschchapov E., Potekhin V.** Fuzzy decision support in distributed v2v systems. *Source: Annals of DAAAM & Proceedings*, 2015, Vol. 26, Iss. 1, Pp. 0097–0103.

7. **Honglei Ren, You Song, Jingwen Wang, Yucheng Hu, Jinzhi Lei.** A deep learning approach to the citywide traffic. Accident risk prediction, *arXiv:1710.09543v2 [cs.CY]. 15 Apr. 2018.*

8. **Ashesh Jain, Avi Singh, Hema S Koppula, Shane Soh, Ashutosh Saxena**. Recurrent neural networks for driver activity anticipation via sensory-fusion architecture, *arXiv: 1509.05016 [cs.CV], 16 Sep. 2015.*

9. **Navaneeth Bodla, Bharat Singh, Rama Chellappa, Larry S. Davis.** Improving object detection with one line of code, *arXiv:1704.04503v2 [cs.CV], 8 Aug. 2017.*

10. **Joe Yue-Hei Ng, Matthew Hausknecht, Sudheendra Vijayanarasimhan, Oriol Vinyals, Rajat Monga, George Toderici**. Beyond short snippets: deep networks for video classification, *arXiv:1503.08909v2 [cs.CV], 13 Apr. 2015.*

11. **Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E.** *Deep Learning.* St. Petersburg: Piter Publ., 2017. (rus)

Received 23.06.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ФЕДОРОВ Александр Викторович
FEDOROV Aleksandr V.
E-mail: alexff91@gmail.com

ШКОДЫРЕВ Вячеслав Петрович
SHKODYREV Viacheslav P.
E-mail: shkodyrev@mail.ru

БАРСУКОВ Никита Дмитриевич
BARSUKOV Nikita D.
E-mail: nikbars1997@gmail.com

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

DOI: 10.18721/JCSTCS.11303
УДК 004.9: 655.3.02

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БУМАЖНЫХ СУБСТРАТОВ И МОДЕЛЬНЫХ ОТТИСКОВ

Е.Л. Виноградов, Д.С. Коротков

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

Исследовано светоотражение и светопропускание двух бумажных субстратов и модельных оттисков, напечатанных на этих материалах струйным и электрофотографическим способами. С указанной целью применялся метод оптического сканирования изучаемых объектов, последовательно размещаемых на черной подложке, эффективно поглощающей световое излучение, и на металлическом зеркале. Сканирование объектов выполнялось с использованием доступного планшетного офисного сканера. Полученные экспериментальные данные об отражении, пропускании, рассеянии и поглощении света в десятках тысяч точек облучаемых образцов обрабатывались в компьютерной программе Scilab-5.3.3, что позволило за короткое время определить и усредненные значения параметров оптических свойств этих объектов, и характеристики их неоднородности. Продемонстрированы преимущества компьютеризованного метода сканирования полиграфических материалов и продуктов перед широко применяемым методом рефлектометрии, показана его перспективность для решения проблемы повышения качества печати. По сравнению со всеми другими известными методами контроля печатной продукции метод ее оптического сканирования наиболее информативен, точен и универсален.

Ключевые слова: информационные технологии, оптическое сканирование, печатная бумага, струйная печать, электрофотография, качество репродуцирования.

Ссылка при цитировании: Виноградов Е.Л., Коротков Д.С. Информационная технология исследования оптических свойств бумажных субстратов и модельных оттисков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 3. С. 29–35. DOI: 10.18721/JCSTCS.11303

INFORMATION TECHNOLOGY FOR STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF PAPER SUBSTRATES AND MODEL PRINTS

Ye.L. Vinogradov, D.S. Korotkov

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

Light reflection and light transmission of two paper substrates and model prints printed on these materials by inkjet and electrophotographic methods are investigated. For this purpose, we have used optical scanning of the given objects placed in series on a black substrate, effectively absorbing light radiation, and on a metal mirror. The objects were scanned using an available flatbed office scanner. The obtained experimental data on reflection, transmission, scattering and absorption of light in tens of thousands of irradiated sample points were processed in a computer program Scilab-5.3.3, which allowed to determine the average parameter values of the optical properties of these objects and the characteristics of their heterogeneityin a short time. As a result, the advantages of the computerized method of scanning printing materials and products over the widely used reflectometry method have been convincingly demonstrated, the method's prospects for solving the problem of improving the printing quality have been confirmed. In comparison with all other known methods for controlling the printed products, the optical scanning method is the most informative, accurate and universal.

Keywords: information technology, optical scanning, printing papers, inkjet printing, electrophotography, the quality of reproduction.

Citation: Vinogradov Ye.L., Korotkov D.S. Information technology for study of optical properties of paper substrates and model prints. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 3, Pp. 29–35. DOI: 10.18721/JCSTCS.11303

Несмотря на бурное развитие электронных средств информационного обмена, ставшее особенно заметным в XXI веке, печатные средства распространения сведений по-прежнему остаются широко востребованными. Вне всяких сомнений, полиграфия выдержала конкуренцию со своим электронным высокоскоростным и вездесущим конкурентом; правда, для этого ей пришлось решительным образом измениться. Современную полиграфию отличает высокий динамизм, достигаемый за счет перехода на малостадийные цифровые технологии репродуцирования исходной информации, которой ныне в обязательном порядке придается форма электронного оригинал-макета [1].

Производственная деятельность многих типографий XXI века ориентирована на массового потребителя, который заинтересован, главным образом, в скорейшем выпуске продукции коммерческого, «делового» назначения, чрезвычайно разнообразной, малотиражной и малообъемной, хорошего качества – хотя, может быть, и не наивысшего [2]. Поддержание на заданном уровне качества репродукций (точности воспроизведения тиражируемого оригинала на оттисках) и, тем более, его повышение остается проблемой актуальной, но в то же время весьма сложной:

- качество полиграфических продуктов определяется множеством факторов: выбором печатающих устройств и режимами их эксплуатации, механическими и оптическими свойствами используемых красок, показателями сорбционных и оптических свойств запечатываемых материалов [3];
- значимость каждого из перечисленных факторов, как и способы его варьирования, нередко заранее неизвестны; в таких случаях оптимальное исполнение заказа, выходящего за рамки накопленного производственного опыта, должно предваряться исследовательскими работами;
- как правило, на проведение исследований в типографиях нет времени, квалифицированных кадров, соответствующего приборного обеспечения, средств на его закупку.

В сложившихся условиях приемлемое решение указанной проблемы находят, исходя из насущной необходимости максимального ускорения печатного процесса. Для этого требуется автоматизированное цифровое оборудование, реализующее бесконтактные «укороченные» полиграфические технологии, например, электрофотографию или импульсную струйную печать. Выбрав печатающие устройства под дикта-

том рынка, полиграфист фактически теряет возможность совершенствования выпускаемой продукции путем регулирования режимов функционирования закупленного оборудования и подбора красок – управляемые компьютерами автоматы работают по несменяемым программам на красках, указанных в технической документации. В рамках парадигмы всемерного сокращения времени исполнения заказов типографии способны поднимать качество изданий только за счет надлежащего выбора запечатываемых материалов.

В настоящее время круг таких материалов очень широк и продолжает расширяться. Однако в этом круге по-прежнему, как и две тысячи лет тому назад, наиболее востребованной остается бумага. По комплексу свойств (механических, сорбционных, оптических) с бумажными субстратами не могут сравниться никакие другие. В частности, бумага, содержащая в качестве связующего очищенную целлюлозу, совершенно не поглощает электромагнитное излучение в оптическом диапазоне; к тому же, благодаря пористой структуре тонкие листы этого материала практически не пропускают, а диффузно отражают световые потоки. Бумажные субстраты не прозрачны, поэтому их можно запечатывать с двух сторон; нанесенные на них черно-белые изображения максимально контрастны; при переносе на печатную бумагу изображений цветных минимален риск нарушения цветопередачи. Зрительное восприятие информации, распространяемой печатными средствами, предполагает ее предварительное «переписывание» на световое излучение; значит, уникальные оптические свойства бумажных субстратов чрезвычайно важны [4].

Выпускается большое количество видов печатных бумаг: матовых и глянцевых, мелованных и немелованных, грубо- и тонкопористых, предназначенных для выпуска специальной продукции, запечатываемых определенными способами и т. п. Удачное решение задачи выбора бумажных субстратов, обеспечивающего требуемое качество репродукций, вполне реально – конечно, если в серии экспериментов выяснить, как влияют оптические показатели бумаг на свойства оттисков, получаемых на имеющемся оборудовании.

Настоящая статья содержит описание перспективной методологии проведения таких опытов, основанной на оптическом сканировании изучаемых объектов.

Экспериментальные данные о сканировании запечатанной и незапечатанной бумаги

Исследовались оптические свойства образцов бумажных субстратов и напечатанных на них модельных оттисков – сплошных черных красочных слоев, нанесенных на бумаги двух видов: высококачественную глянцевую Color Copy Coated Silk с массой единичной площади $m = 166$ г/м^2 и «обычную» потребительскую Кондопожского ЦБК с $m = 64$ г/м^2. Именно оптика полиграфических материалов и продуктов, в конечном итоге, и определяет качество репродукционного процесса. Запечатывались бумажные субстраты способами струйным (на принтере Epson L 110) и электрофотографическим (с помощью принтера Canon MF 4140).

Оптические показатели субстратов и модельных оттисков находились методом сканирования на отражение [4, с. 46–66; 5]; в этих целях применялся планшетный сканер Samsung SCX-3200, характеризуемый разрешением 1200 dpi. Образцы бумажных субстратов сканировались дважды (при размещении на черной и зеркальной подложках), что позволило рассчитать параметры взаимодействия света с бумагами в их объемах, т. е. коэффициенты диффузного рассеяния и поглощения α_p, α_n [4, с. 34–46; 6; 7]. При этих расчетах использовались следующие формулы:

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_p} = \frac{(1 - R_1)(1 - R_0)}{2 R_0}, \qquad (1)$$

$$A = 1 + \frac{\alpha_n}{\alpha_p}, \qquad (2)$$

$$\alpha_p m = \frac{1}{2\sqrt{A^2 - 1}} \left[\ln \frac{R_0 - A - \sqrt{A^2 - 1}}{R_0 - A + \sqrt{A^2 - 1}} - \right.$$
$$\left. - \frac{A + \sqrt{A^2 - 1}}{A - \sqrt{A^2 - 1}} \right], \qquad (3)$$

где R_0 и R_1 – средние коэффициенты отражения светового излучения образцами, расположенными на черной, хорошо поглощающей свет, и зеркальной подложках, соответственно. Если коэффициент поглощения много меньше коэффициента диффузного рассеяния (а для хороших бумаг так и должно быть), то для α_p справедлива значительно более простая формула, чем (3) [4, с. 30; 8]:

$$\alpha_p\, m = \frac{R_0}{1 - R_0}. \qquad (4)$$

Сравнительная визуальная оценка светоотражения запечатываемых материалов (бумаг) группами квалифицированных экспертов, весьма популярная в недавнем прошлом, ныне рассматривается как очевидный анахронизм, поскольку метод экспертизы субъективен, не универсален и не точен. В настоящее время его полностью вытеснила рефлектометрия – измерение с помощью фотометров и оптических денситометров коэффициентов отражения света различными субстратами при варьировании их толщины и длины волны излучателей, замене подложек. Приборное обеспечение объективного, универсального и достаточно точного рефлектометрического метода находится на высоком уровне, и это еще одна причина его широкого распространения.

Однако рефлектометрии, при всех ее достоинствах, присущ неустранимый недостаток: она не пригодна для изучения и микро-, и макронеоднородности объектов в масштабах, соответственно, $\sim 1 \div 10$, 10, $\sim 10^2 \div 10^3$ мкм (а бумажные субстраты заведомо в большей или меньшей степени неоднородны, и такая их особенность сопряжена с риском заметного снижения качества оттисков). Лишенный упомянутого недостатка метод оптического сканирования по этому признаку явно предпочтительнее рефлектометрии [5]. К тому же, он превосходит другие известные методы исследования неоднородности материалов по доступности, быстродействию и экологической безопасности [9].

Сканирование субстратов и оттисков с последующей обработкой сканов в компьютерной программе Scilab-5.3.3 открывает возможность характеризовать отражательную способность исследуемых объектов не только их усредненными показателями, но и параметрами оптической неоднородности (в частности, значениями коэффициента вариации $K_{\text{вар}}$). Кроме того, при выполнении двойного сканирования можно определить параметр светопроницаемости образцов – их средний коэффициент пропускания T [4, с. 39; 7]:

$$T = \sqrt{(R_1 - R_0)(1 - R_0)}. \qquad (5)$$

Выбор пакета Scilab обусловлен следующими обстоятельствами: во-первых, в его составе имеется инструмент Scilab Image and Video Processing Toolbox, необходимый для статистического анализа изображений субстратов и оттисков, в том числе многоцветных; во-вторых, он в отличие от более мощного пакета MATLAB бесплатен и, следовательно, доступен для предельно широкого круга исследователей и полиграфистов-практиков.

Компьютеризованный метод сканирования применительно к решению проблем полиграфии с надлежащей тщательностью пока еще не апробировался. Можно сослаться лишь на публикацию по этой теме [10], посвященную описанию успешно завершившегося исследования влияния неоднородности бумаги на качество струйной печати (однако в указанной работе использовалась компьютерная программа, доступ к которой строго ограничен).

Результаты проведенных нами экспериментов просуммированы в табл. 1–3.

Из табл. 1 видно, что по усредненному коэффициенту отражения света исследованные субстраты почти не отличаются – их отражательная способность очень высока (и этим ограничивается информация, которую можно получить критикуемым нами методом рефлектометрии). Однако по результатам компьютеризованного метода сканирования различия между глянцевой и потребительской бумагами велики и хорошо заметны: второй субстрат в три раза более оптически неоднороден, диффузное рассеяние света в нем в шесть раз менее эффективно, он светопроницаем, наконец, он лучше поглощает свет – в 2,5 раза. От-

Таблица 1

Показатели оптических свойств бумажных субстратов

Table 1

Optical properties of paper substrates

Субстрат (бумага)	R_1	R_0	$K_{вар}$	T	α_p, м^2/кг	α_n, м^2/кг
Глянцевая	0,999	0,999	0,01	0	6000	0,003
Потребительская	0,999	0,985	0,03	0,015	1000	0,008

Таблица 2

Характеристики отражательной способности сплошных красочных слоев

Table 2

Characteristics of the reflectivity of continuous paint layers

Субстрат (бумага)	Способ печати	R_1	$K_{вар}$
Глянцевая	Струйный	0,12	0,5
Глянцевая	Электрофотографический	0,13	0,5
Потребительская	Струйный	0,23	0,5
Потребительская	Электрофотографический	0,13	0,7

Таблица 3

Параметры отражательной способности оборотной стороны плотно закрашенных бумажных листов

Table 3

The parameters of the reflectivity of the reverse side of densely filled paper sheets

Субстрат (бумага)	Способ печати	R_1	$K_{вар}$
Глянцевая	Струйный	0,999	0,1
Глянцевая	Электрофотографический	0,999	0,1
Потребительская	Струйный	0,890	0,2
Потребительская	Электрофотографический	0,980	0,06

меченные недостатки потребительской бумаги должны сказываться на качестве ее запечатывания, что экспериментально уверенно подтверждается.

По данным табл. 2 (см. четвертый столбец) сплошные красочные слои, по крайней мере, на порядок более неоднородны, чем субстраты. Все они выглядят темно-серыми, причем слой, нанесенный струйным способом на потребительскую бумагу, светлее других (см. третий столбец). В этом отношении предпочтение следует отдать электрофотографической печати, хотя полученные этим способом модельные оттиски несколько более неоднородны.

Из табл. 3 следует, что маловязкая черная краска, применяемая в струйных принтерах, пробивается на оборотные стороны запечатываемых листов менее плотной светопроницаемой потребительской бумаги, снижая их светоотражение и увеличивая оптическую неоднородность. Этот отрицательный эффект почти не заметен при использовании электрофотографии.

Заключение

Экспериментально доказаны преимущества компьютеризованного метода оптического сканирования полиграфических материалов и модельных оттисков при выборе печатающих устройств и субстратов, обеспечивающем выпуск продукции надлежащего качества. Достоинства обсуждаемого метода состоят в следующем:

1. Оборудование для реализации сканирования (работающие на отражение планшетные сканеры, персональные компьютеры с программным обеспечением типа Scilab-5.3.3) сравнительно дешево, экологически безопасно и широко распространено. Значит, внедрение этого метода в производственную практику типографий не должно наталкиваться на сколько-нибудь серьезные препятствия.

2. Информативность метода сканирования уникальна. При использовании черных и зеркальных подложек он позволяет в одном опыте количественно охарактеризовать весьма разнообразные изучаемые объекты и средними значениями показателей отражения, пропускания, поглощения света, и параметрами их оптической неоднородности.

3. Компьютеризованное сканирование экспрессно и не трудозатратно. Длительность полномасштабного опыта составляет всего несколько десятков минут.

4. Метод сканирования беспрецедентно точен. Фактически при его использовании можно в течение минуты измерить многочисленные оптические показатели образца в десятках и даже сотнях тысяч точек, отстоящих друг от друга на расстояние порядка 10 мкм (при разрешающей способности сканера 2400 dpi). В такой ситуации погрешность измерений уже не зависит от числа отсчетов, она определяется техническими характеристиками измерительного прибора (сканера). Например, в наших опытах величины коэффициентов отражения находились с относительной погрешностью 0,4 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кипphан Г.** Энциклопедия по печатным средствам информации. М.: МГУП, 2003. 1253 с.

2. **Романо Ф.** Принт-медиа бизнес. Современные технологии издательско-полиграфической отрасли. М.: ПРИНТ-МЕДИА центр, 2006. 456 с.

3. **Леонтьев В.Н.** Методы и средства совершенствования печатных бумаг в системе «бумага-краска-оттиск». СПб.: ГУРП, 2008. 170 с.

4. **Ваганов В.В., Виноградов Е.Л., Тропец. В.А.** Оптика бумаги и оттиска. СПб.: СПбГПУ, 2015. 144 с.

5. **Виноградов Е.Л., Тропец В.А., Чекменев К.А.** Новый способ исследования оптических свойств запечатываемых материалов с применением сканирующих устройств, работающих на отражение // Дизайн. Материалы. Технология. 2015. № 1 (36). С. 53–57.

6. **Kubelka P., Munk F.** A contribution to the optics of colorant layers // Papermaking Science Technology. 1931. No. 12 (11A). Pp. 593–601.

7. **Виноградов Е.Л., Тропец В.А.** Исследование оптических свойств печатной бумаги. Комплексный подход // Дизайн. Материалы. Технология. 2011. № 4 (19). С. 47–50.

8. **Vinogradov E.L.** Indexes of optical properties of print paper: the simplified definition // Conference Proceeding Book. 2006. Pp. 112–113.

9. **Tomimasu H., Luner P., Kim D., Suk D.** Comparison of four paper imaging techniques: P-radiography, electrography, light transmission and soft X- radiography // Tappi Journal. 1991, July. P. 165.

10. **Виноградов Е.Л., Тропец В.А.** Исследование прогностической способности различных методов оценки неоднородности бумаги при определении ее влияния на дефекты струйной печати // Вестник СПбГУПТД. Естественные и технические науки. 2016. № 1. С. 129–135.

Статья поступила в редакцию 21.06.2018.

REFERENCES

1. **Kipphan G.** *Encyclopedia of printed media.* Moscow: MGUP Publ., 2003, 1253 p. (rus)

2. **Romano F.** *Print-media business. Modern technologies of publishing and printing industry.* Moscow: PRINT-MEDIA centre, 2006, 456 p. (rus)

3. **Leontiev V.N.** *Methods and means of improvement of printing papers in the system "paper-paint-print".* St. Petersburg: GURP Publ., 2008, 170 p. (rus)

4. **Vaganov V.V., Vinogradov E.L., Tropets V.A.**

Optics paper and print. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2015, 144 p. (rus)

5. **Vinogradov E.L., Tropetz V.A., Chekmenev K.A.** A new method of studying the optical properties of printed materials using scanning devices working on reflection. *Design. Materials. Technology*, 2015, No1 (36), Pp. 53–57. (rus)

6. **Kubelka P., Munk F.** A contribution to the optics of colorant layers. *Papermaking Science Technology*, 1931, No. 12 (11A), Pp. 593–601.

7. **Vinogradov E.L., Tropets V.A.** Investigation of optical properties of printing paper. Integrated approach. *Design. Materials. Technology*, 2011, No. 4 (19), Pp. 47–50. (rus)

8. **Vinogradov E.L.** Indexes of optical properties of print paper: the simplified definition. *Conference Proceeding Book*, 2006, Pp. 112–113.

9. **Tomimasu H., Luner P., Kim D., Suk D.** Comparison of four paper imaging techniques: P-radiography, electrography, light transmission and soft X- radiography. *Tappi Journal*, July, 1991, P. 165.

10. **Vinogradov E.L., Tropez V.A.** Investigation of the predictive ability of different methods for the evaluation of the heterogeneity of the paper in determining its effect on defects of ink-jet printing. *Bulletin of SPbGUPTA. Natural and technical sciences*, 2016, No. 1, Pp. 129–135. (rus)

Received 21.06.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ВИНОГРАДОВ Евгений Леонидович
VINOGRADOV Yevgeni L.
E-mail: vinogradov-el@rambler.ru

КОРОТКОВ Дмитрий Станиславович
KOROTKOV Dmitry S.
E-mail: dkor1@yandex.ru

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

FedCSIS

Federated Conference on Computer Science and Information Systems

1-4 September, 2019
Leipzig, Germany

Call for Event:

The FedCSIS multi-conference consists of a significant number of antecedent Events. However, the Call for Events is open to all areas of computer science and information systems and new proposals for associated Events (conferences, symposia, workshops, special sessions, project dissemination events, etc.) are cordially invited until **November 20, 2018**.

The proposals should be prepared according to requirements specified in the Call for Events on the conference website http://www.fedcsis.org and emailed in a single PDF file to **secretariat@fedcsis.org**

The Events will be selected based on the scientific merit and/or the relevance to ICT practice, the completeness and clarity of the proposal in addressing the requested information, the strength of the proposed Program Committee, and the capacity of the FedCSIS conference program.

PTI
POLSKIE TOWARZYSTWO INFORMATYCZNE
ODDZIAŁ MAZOWIECKI

e-mail: secretariat@fedcsis.org
www.fedcsis.org

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

DOI: 10.18721/JCSTCS.11304
УДК 621.391.8

РАСЧЕТ ПИК-ФАКТОРА МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ И НЕОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

А.В. Рашич, Т.Н. Нгуен, В.А. Сальников

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

Предложены алгоритмы для расчета выборочных среднего и дисперсии пик-фактора многочастотных сигналов с ортогональным (OFDM-сигналы) и неортогональным (SEFDM-сигналы) частотным уплотнением, представлены результаты моделирования при различном количестве поднесущих, способах манипуляции и коэффициенте уплотнения. Показано, что пик-фактор многочастотных сигналов, рассчитанный по отсчетам сигнала на исходной частоте дискретизации, может значительно отличаться от пик-фактора, рассчитанного по восстановленному из отсчетов непрерывному сигналу. Точность расчета параметров распределения пик-фактора зависит от размера выборки многочастотных символов, а также от коэффициента передискретизации. Получены значения условий моделирования (размеры выборки и коэффициенты передискретизации), при которых дальнейшее увеличение вычислительной сложности практически не влияет на значения выборочных среднего и дисперсии пик-фактора. Разработанные методы расчета применимы как для малого, так и для большого числа поднесущих.

Ключевые слова: OFDM, NOFDM, SEFDM, multicarrier FTN, PAPR, 5G, crest factor, пик-фактор, выборочное среднее, выборочная дисперсия.

Ссылка при цитировании: Рашич А.В., Нгуен Т.Н., Сальников В.А. Расчет пик-фактора многочастотных сигналов с ортогональным и неортогональным частотным уплотнением // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 3. С. 37–48. DOI: 10.18721/JCSTCS.11304

METHOD FOR CALCULATING PEAK-TO-AVERAGE POWER RATIO OF OFDM- AND SEFDM-SIGNALS

A.V. Rashich, T.N. Nguen, V.A. Salnikov

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

The paper presents the algorithms for sample mean and dispersion of peak-to-average-power-ratio (PAPR) of multicarrier signals with orthogonal (OFDM-signals)

and non-orthogonal (SEFDM-signals) multiplexing. The simulation results are also presented for some subcarriers and modulation types. It is shown that the PAPR calculated over the signal samples on the basic sampling frequency differs greatly from the PAPR calculated over the equivalent continuous signal. The accuracy of the calculated sample mean and dispersion of PAPR depends on the sample size and on the oversampling rate. Simulation results are proposed for the sample sizes and oversampling rates for which further increase in computation complexity does not affect the sample mean and dispersion of PAPR. The proposed algorithms are applicable for any number of subcarriers in the multicarrier signal.

Keywords: OFDM, NOFDM, SEFDM, multicarrier FTN, PAPR, 5G, crest factor, sample mean, sample dispersion.

Citation: Rashich A.V., Nguen T.N., Salnikov V.A. Method for calculating peak-to-average power ratio of OFDM- and SEFDM-signals. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 3, Pp. 37–48. DOI: 10.18721/JCSTCS.11304

Введение

В связи с длительной разработкой стандартов сотовой связи пятого поколения 5G, в которых на физическом уровне применяются многочастотные сигналы, и публикацией первых версий этих стандартов* повышенный интерес исследователей и разработчиков привлекают методы синтеза многочастотных сигналов с заданными характеристиками, разработка их алгоритмов формирования и приема, а также исследование различных характеристик. Наибольшее распространение в действующих беспроводных системах передачи данных (WiFi-a, g, n, ac, ax, LTE, DVB-T2) получили многочастотные сигналы с ортогональным частотным уплотнением (Orthogonal frequency division multiplexing – OFDM). Также интерес представляют модификации этих сигналов с неортогональным частотным уплотнением, позволяющим добиться более высокой спектральной эффективности по сравнению с OFDM-сигналами (Spectrally efficient frequency division multiplexing – SEFDM) [1, 7].

Важная характеристика многочастотных сигналов – пик-фактор. Оценка его значений необходима при проектировании усилителя мощности передающего устройства [3]. Высокое значение пик-фактора сигнала приводит либо к недоиспользованию усилителей мощности и, как следствие, к снижению средней мощности сигнала и помехоустойчивости его приема, либо к повышению уровня нелинейных искажений в сигнале, что, в свою очередь, приводит к увеличению уровня внеполосных излучений, а также к снижению помехоустойчивости приема [3–5].

Пик-фактор многочастотного сигнала является случайной величиной, его значения меняются в зависимости от конкретных значений модуляционных символов поднесущих, которые применяются в данном символе. Возможны комбинации модуляционных символов, когда все или почти все поднесущие складываются синфазно в какой-либо момент времени, что приводит к чрезвычайно высокому значению пик-фактора (десятки дБ). Также возможны комбинации модуляционных символов, когда пик-фактор символа будет относительно низким. Тем не менее, как показано в [3, 5, 6], а также подтверждено результатами моделирования настоящей работы, вероятность таких событий крайне невысока, а большая часть значений пик-фактора близка к выборочному среднему. С другой стороны, количество различных комбинаций модуляционных символов является степенной функцией от числа поднесущих. При их большом количестве (более ста) перебор всех символов для расчета среднего значения пик-фактора за приемлемое для получения результатов моделирования время невозможен на современной элементной базе.

* Спецификации 5G // URL: http://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm

При разработке различных методов снижения пик-фактора его расчет выполняется непосредственно по временным отсчетам символа на исходной частоте дискретизации (например, [3–6]). Но пик-фактор непрерывного сигнала, восстановленного из этих отсчетов, будет отличаться от пик-фактора, посчитанного по отсчетам. Как показано в данной статье, отклонение может составлять до 1 дБ, что делает результаты анализа алгоритмов снижения пик-фактора некорректными.

Таким образом, при сравнении различных методов снижения пик-фактора, а также при анализе пик-фактора многочастотных сигналов совместно с усилителями мощности важно корректно рассчитывать значения пик-фактора относительно простыми с вычислительной точки зрения методами. В настоящей статье предложены алгоритмы для выполнения таких расчетов, представлены результаты моделирования для выборочных среднего и дисперсии многочастотных сигналов с ортогональным и неортогональным частотным уплотнением при различном количестве поднесущих и способах манипуляции.

Пик-фактор многочастотного сигнала

Многочастотный сигнал с N поднесущими частотами на длительности символа T в основной полосе частот может быть записан следующим образом:

$$s(t) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} C_k e^{j2\pi\Delta fkt},\ t \in [0;T], \qquad (1)$$

где C_k – манипуляционный символ k-й поднесущей, Δf – частотный разнос между соседними поднесущими. В случае, когда $\Delta f = 1/T$, $s(t)$ представляет из себя OFDM-сигнал; если $\Delta f = \alpha / T < 1 / T$, где $0 < \alpha < 1$, то $s(t)$ является **SEFDM-сигналом, а коэффициент** α называется коэффициентом частотного уплотнения. Для OFDM-сигналов $\alpha = 1$. Для уменьшения влияния наложения спектров соседних по частоте сигналов используются защитные интервалы по частоте $C_k = 0$ при $k \in [0; N_{\text{GI_left}} - 1]$ и $k \in [N - N_{\text{GI_right}}; N - 1]$, где $N_{\text{GI_left}}$ – количество неиспользуемых поднесущих «слева» в области отрицательных частот, $N_{\text{GI_right}}$ – количество неиспользуемых поднесущих «справа» в области положительных частот.

Пик-фактором сигнала $s(t)$ называется отношение его максимальной мгновенной мощности к средней:

$$\Pi = \max_{t\in[0;T]} \frac{p(t)}{P_{\text{ср}}},\ \ p(t) = s(t)s^*(t),$$
$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt. \qquad (2)$$

На рис. 1 приведен пример OFDM-символа, по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат – нормированная к средней

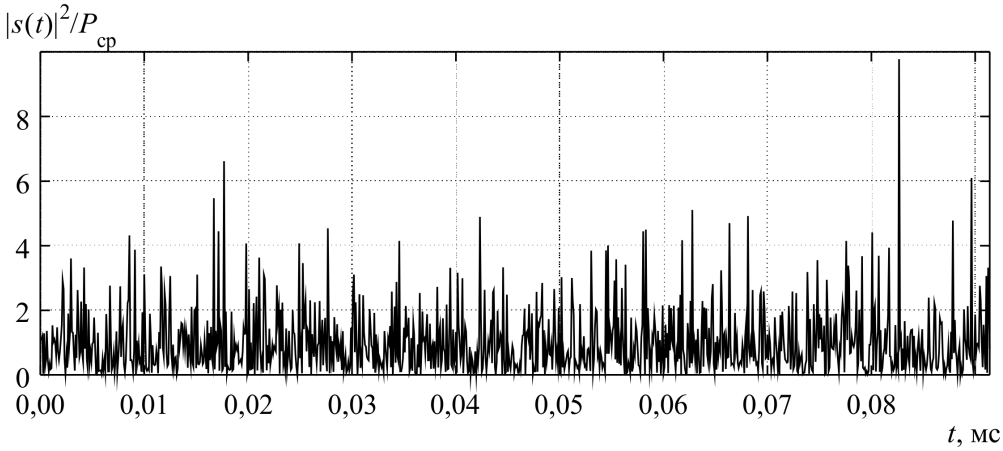

Рис. 1. Пример OFDM-символа с КАМ-4, $N = 840$

Fig. 1. Example of OFDM-symbol with QAM-4, $N = 840$

мощности символа мгновенная мощность. Из графика видно, что пик-фактор символа равен $\Pi \approx 10 = 10$ дБ.

Расчет математического ожидания и дисперсии пик-фактора

Обработка сигналов в основной полосе частот обычно выполняется в цифровом виде. Рассмотрим дискретное представление многочастотных сигналов с частотой дискретизации $F_s = 1/\Delta t = N\Delta f$. Тогда справедливы выражения $\Delta t \Delta f = 1/N$ и $T/\Delta t = N\alpha = L$. Количество отсчетов на длительности одного символа у дискретных SEFDM-сигналов в α раз меньше, чем у OFDM-сигналов с такой же длительностью. У OFDM-сигналов $L = N$.

Дискретный многочастотный сигнал на длительности символа в основной полосе частот можно представить в следующем виде:

$$s(n\Delta t) = s_n = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} C_k e^{j2\pi\frac{kn}{N}},\ n = \overline{0 \ldots L-1}. \quad (3)$$

Для формирования OFDM-сигналов в соответствии с (3) применяется ОБПФ (обратное быстрое преобразование Фурье) с размерностью N_{IFFT}, равной ближайшей сверху степени 2 к N. Для формирования

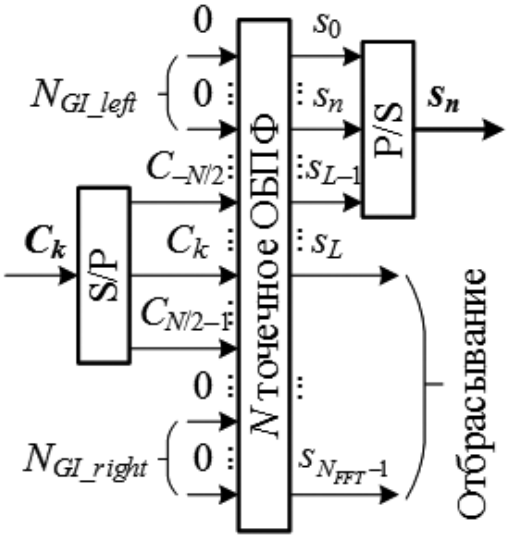

Рис. 2. Структурная схема алгоритма формирования SEFDM-сигналов

Fig. 2. The structure of SEFDM-symbol generator

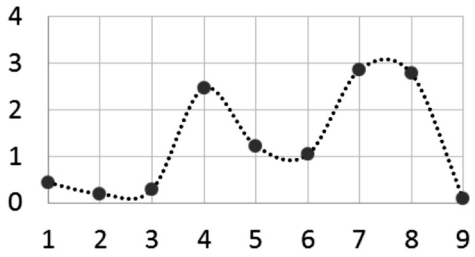

Рис. 3. Схематичный пример расположения максимума мгновенной мощности символа между отсчетами 7 и 8

Fig. 3. Example of maximum power position between samples 7 and 8

SEFDM-сигналов в данной статье используется метод на основе ОБПФ с аналогичной размерностью N_{IFFT} [2]. На выходе ОБПФ оставляются только первые L отсчетов, остальные отбрасываются. На рис. 2 изображена структурная схема, описывающая этот алгоритм.

Пик-фактор дискретного многочастотного сигнала $\{s_n\}_{n=0}^{L-1}$ по аналогии с (2) можно рассчитать следующим образом:

$$\Pi = \frac{\max\limits_{n=0,\ \ldots,\ L-1}\{p_n\}}{P_{\text{ср}}},\quad p_n = s_n s_n^*, \quad (4)$$

$$n = 0,\ 1,\ \ldots,\ L-1,\quad P_{\text{ср}} = \frac{1}{L}\sum_{n=0}^{L-1} p_n.$$

Тем не менее, прямое (при подстановке отсчетов из (3) в (4)) применение выражения (4) приведет к некорректным результатам, ошибке при вычислении пик-фактора. Это обусловлено дискретностью представления (3) и, как следствие, возможностью не учесть в расчете локальных максимумов сигнала, находящихся между соседними отсчетами (рис. 3). То есть непрерывный сигнал, восстановленный из (3), может иметь максимум мгновенной мощности между отсчетами.

Для того чтобы уменьшить ошибку расчета пик-фактора, обусловленную дискретным представлением сигнала, предлагается повышать частоту дискретизации, на которой выполняется расчет, и увеличивать размерность ОБПФ N_{IFFT} в $K = 2^p$ раз, где $p \in \mathbb{N}$, K – коэффициент передискретизации. Для полученных временных отсчетов передиа-

Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета пик-фактора одного OFDM- или SEFDM-символа

Fig. 4. Algorithm for PAPR calculation of one SEFDM-symbol

скретизированного символа по (4) рассчитывается мгновенная мощность, средняя и пик-фактор. Описанный алгоритм расчета пик-фактора представлен на рис. 4.

Напомним, что интерес представляют не значения пик-фактора отдельных символов, а их средние значения и дисперсии, а также вероятности превышения пик-фактора некоторого заданного порога.

Для нахождения оценок среднего значения и дисперсии пик-фактора генерируются выборки из N_{exp} OFDM- или SEFDM-символов. Находится пик-фактор на длительности каждого символа в соответствии с алгоритмом на рис. 4, и рассчитываются выборочное среднее значение и выборочная исправленная дисперсия по следующим формулам:

$$\bar{\Pi} = \frac{1}{N_{\text{exp}}} \sum_{i=1}^{N_{epx}} \Pi_i, \tag{5}$$

$$S^2 = \frac{1}{N_{\text{exp}} - 1} \sum_{i=1}^{N_{\text{exp}}} (\Pi_i - \bar{\Pi})^2. \tag{6}$$

Данные оценки также являются случайными величинами, их математическое ожидание равно оцениваемым параметрам: $\mathbb{E}[\bar{\Pi}] = \mathbb{E}[\Pi]$, $\mathbb{E}[S] = D[\Pi]$. Также выборочное среднее и выборочная дисперсия сходятся по вероятности к математическому ожиданию и дисперсии пик-фактора: $\bar{\Pi} \xrightarrow{\mathbb{P}} \mathbb{E}[\Pi]$, $S \xrightarrow{\mathbb{P}} D[\Pi]$. Это показывает, что при увеличении размера выборки N_{exp} значения оценок будут приближаться к действительным значениям параметров распределения пик-фактора.

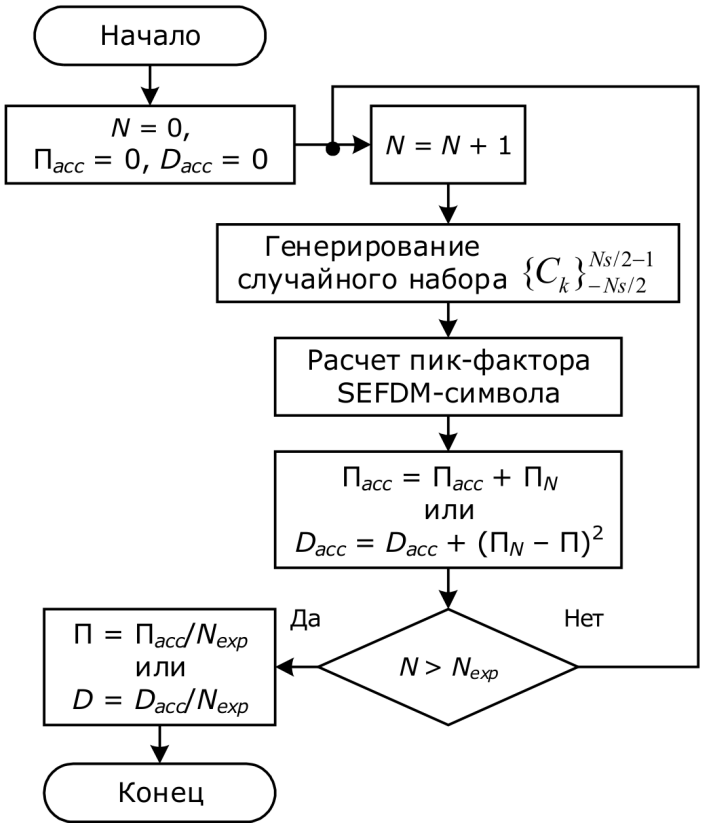

Рис. 5. Блок-схема алгоритмов расчета выборочных среднего и дисперсии пик-фактора многочастотных сигналов

Fig. 5. Algorithms for mean PAPR and its variance calculation for multicarrier signals

На рис. 5 представлена блок-схема расчета выборочных среднего и дисперсии пик-фактора SEFDM-сигналов. Последовательно генерируются случайные манипуляционные символы с помощью равномерного распределения. Далее описанным выше способом формируются OFDM- или SEFDM-символы на повышенной частоте дискретизации и рассчитывается их пик-фактор. Результат накапливается в аккумуляторе. После анализа N_{exp} символов рассчитываются окончательные значения выборочного среднего или дисперсии.

Результаты моделирования

В ходе имитационного моделирования получены два типа зависимостей: зависимости выборочного среднего пик-фактора и выборочной дисперсии пик-фактора от размера генерируемой выборки N_{exp} и от коэффициента передискретизации K.

При моделировании использовались параметры OFDM-сигналов, которые применяются в существующих беспроводных системах передачи данных (см. табл.).

На рис. 6 представлены зависимости выборочного среднего пик-фактора многочастотных сигналов с ортогональным и неортогональным ($\alpha = 1/2$) частотным уплотнением от количества генерируемых OFDM- или SEFDM-символов соответственно. В соответствии с таблицей, моделирование выполнено для 114, 1201 и 27841 информационных поднесущих в сигнале. Размерность ОБПФ была выбрана 128, 2048, 32768 соответственно. Методы модуляции – КАМ-4 и КАМ-64. Значения среднего пик-фактора отложены по оси ординат в децибелах, по оси абсцисс – размер выборки в логарифмическом масштабе.

Параметры OFDM-сигналов различных беспроводных систем передачи данных

OFDM-signals parameters for various modern telecommunication systems

Система	Количество поднесущих	Размерность ОБПФ $N_{IFFT}^{(0)}$
Wi-Fi-a,g	52	128
Wi-Fi-n	114	128
WiMAX	865	1024
LTE	1201	2048
DVB-T2	27841	32768

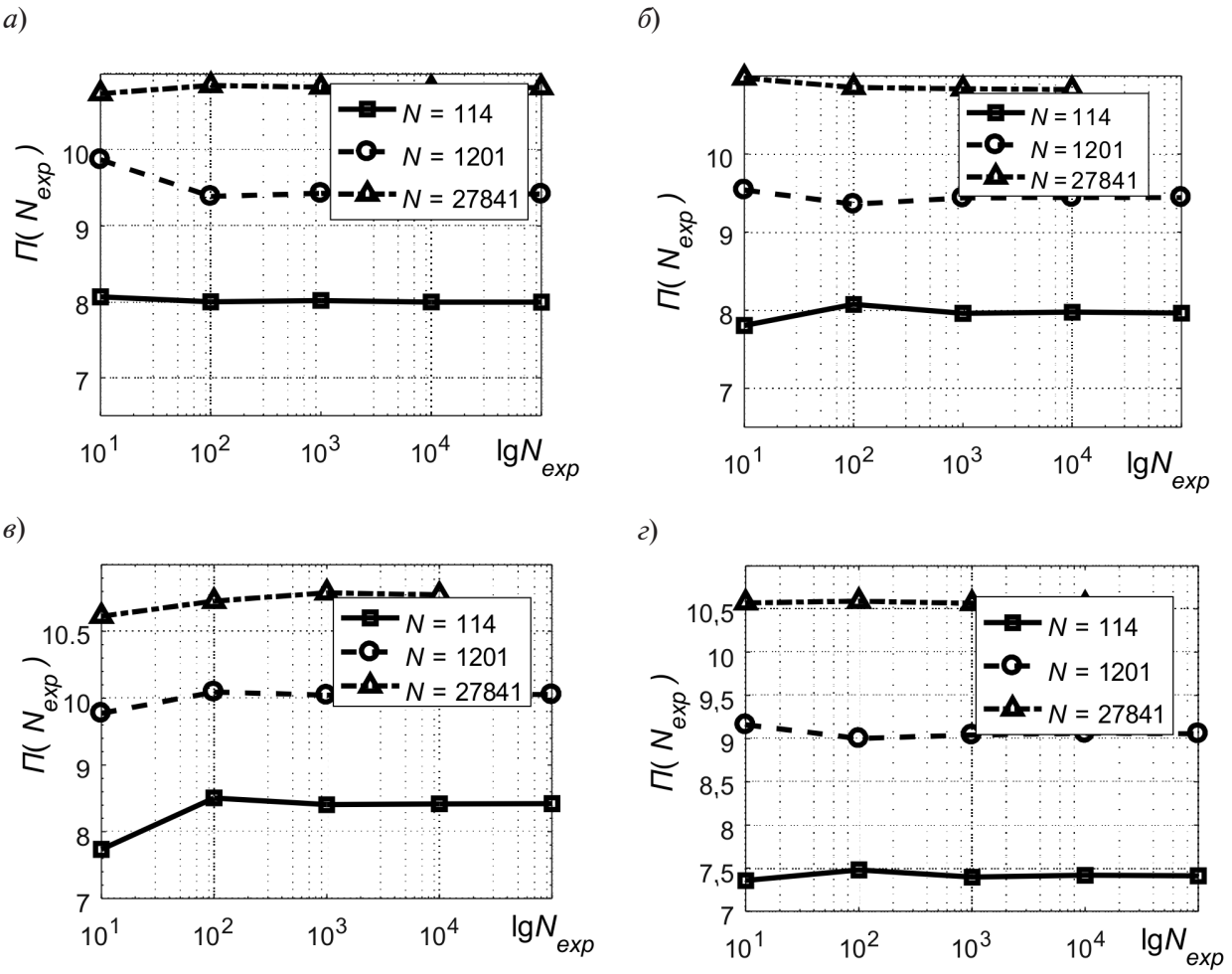

Рис. 6. Зависимость математического ожидания пик-фактора многочастотных сигналов от количества экспериментов при различном количестве поднесущих и способах модуляции: *а* – OFDM, КАМ-4; *б* – OFDM, КАМ-64; *в* – SEFDM, КАМ-4, $\alpha = 1/2$; *г* – SEFDM, КАМ-64, $\alpha = 1/2$

Fig. 6. Mean PAPR of multicarrier signals vs number of experiments for various number of subcarriers and modulation schemes:
а – OFDM, КАМ-4; *б* – OFDM, КАМ-64; *в* – SEFDM, КАМ-4, $\alpha = 1/2$; *г* – SEFDM, КАМ-64, $\alpha = 1/2$

Из приведенных на рисунке графиков видно, что выборочное среднее пик-фактора многочастотных сигналов при любом числе информационных поднесущих, методе модуляции и коэффициенте уплотнения, рассмотренных в моделировании, практически не зависит от размера выборки при $N_{exp} > 10^2$.

При этом выборочное среднее пик-фактора SEFDM-символов меньше выборочного среднего пик-фактора OFDM-символов для любого числа информационных поднесущих. Как для OFDM-символов, так и для SEFDM-символов с ростом числа поднесущих средний пик-фактор увеличивается. Например, при размере выборки 10^2 среднее значение пик-фактора SEFDM-символа с 114 информационными поднесущими меньше среднего пик-фактора символа с 1201 поднесущими на 1,5 дБ при модуляции поднесущих КАМ-64.

На рис. 7 представлены зависимости выборочной дисперсии пик-фактора многочастотных сигналов от количества генерируемых OFDM- или SEFDM-символов соответственно. Условия моделирования не менялись. Значения выборочной дисперсии пик-фактора отложены по оси ординат без перевода в децибелы, на оси абсцисс – размер выборки в логарифмическом масштабе. Выборочная дисперсия не увеличивается с ростом числа информационных поднесущих. Выборочная дисперсия многочастотных сигналов независимо от числа поднесущих и коэффициента уплотнения практически не зависит от размера выборки при $N_{exp} > 10^3$.

Увеличение размера выборки влечет за собой возрастание вычислительной сложности моделирования. Полученные результаты показывают, что для моделирования достаточно размера выборки $N_{exp} = 10^4$. Данное значение будет использоваться в следующих экспериментах.

На рис. 8 представлены зависимости выборочного среднего пик-фактора OFDM- и SEFDM-сигналов от коэффициента передискретизации K. В соответствии с таблицей, моделирование проводилось для 5, 10, 52, 114, 865, 1201, 27841 информационных поднесущих и размерностей ОБПФ до передискретизации 8, 16, 64, 128, 1024, 2048, 32786 соответственно. Коэффициент уплотнения SEFDM-символов $\alpha = 0,5$. Методы модуляции – КАМ-4 и КАМ-64. Среднее значение пик-фактора считалось для исходной размерности ОБПФ и для размерности, увеличенной в K раз. По представленным зависимостям видно, что выборочное сред-

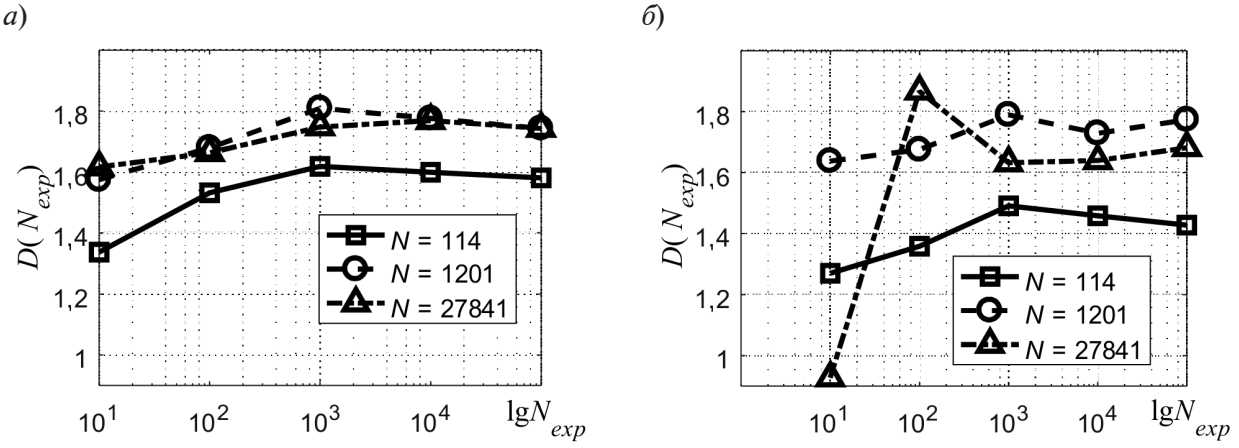

Рис. 7. Зависимость дисперсии пик-фактора многочастотных сигналов от количества экспериментов при различном количестве поднесущих и способах модуляции: *а* – OFDM, КАМ-64; *б* – SEFDM, КАМ-64, $\alpha = 1/2$

Fig. 7. PAPR variance of multicarrier signals vs number of experiments for various number of subcarriers and modulation schemes: *а* – OFDM, КАМ-64; *б* – SEFDM, КАМ-64, $\alpha = 1/2$

нее пик-фактора почти перестает зависеть от коэффициента передискретизации при $K > 4$. Это означает, что временные отсчеты дискретных OFDM- и SEFDM-сигналов берутся достаточно часто для определения пиковой мощности аналогового сигнала. С другой стороны применение низкого коэффициента передискретизации ($1 < K < 4$) при расчете пик-фактора может приводить к ошибкам до 1 дБ. Такая ошибка при анализе различных алгоритмов снижения пик-фактора является недопустимой и приводит к некорректным результатам.

Вычислительная сложность алгоритма ОБПФ равна $O(N_{IFFT} \log_2 N_{IFFT})$ операций. В свою очередь для символа с передискретизацией – равна $O(KN_{IFFT} \log_2 KN_{IFFT})$. Тогда, например, для SEFDM-сигнала с 865 информационными поднесущими и исходной размерностью ОБПФ 1024 разница средних значений пик-фактора при $K = 1$ и $K = 2$ составляет 0,337 дБ, а вычислительная сложность повышается в 2,2 раза. Для этого же сигнала разность среднего пик-фактора при $K = 2$ и $K = 4$ составляет 0,18 дБ, а вычислительная сложность повышается в 2,18

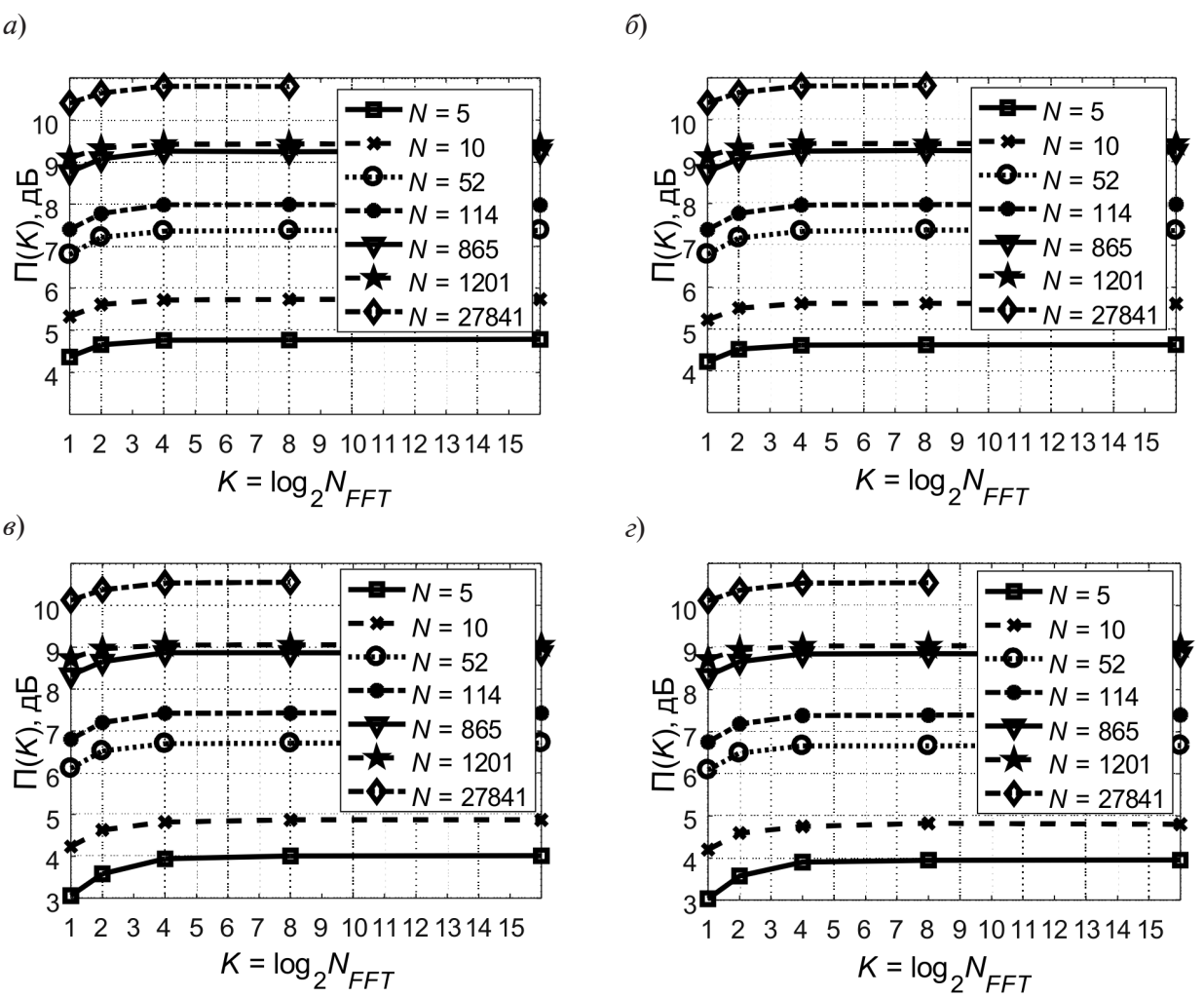

Рис. 8. Зависимость математического ожидания пик-фактора многочастотных сигналов от коэффициента передискретизации при различном количестве поднесущих и способах модуляции: *а* – OFDM, КАМ-4; *б* – OFDM, КАМ-64; *в* – SEFDM, КАМ-4, $\alpha = 1/2$; *г* – SEFDM, КАМ-64, $\alpha = 1/2$

Fig. 8. Mean PAPR of multicarrier signals vs upsampling factor for various number of subcarriers and modulation schemes: *а* – OFDM, КАМ-4; *б* – OFDM, КАМ-64; *в* – SEFDM, КАМ-4, $\alpha = 1/2$; *г* – SEFDM, КАМ-64, $\alpha = 1/2$

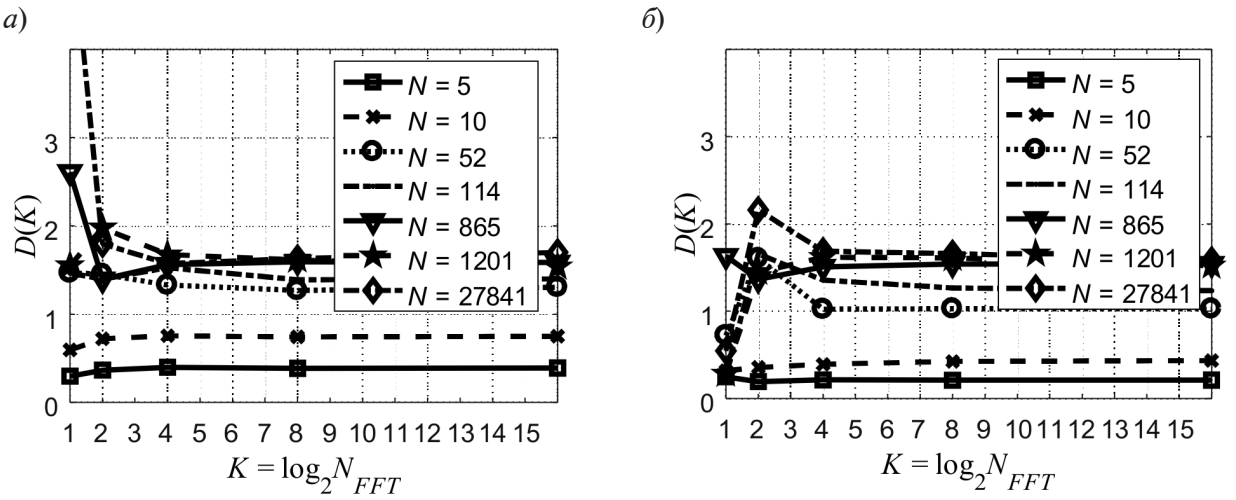

Рис. 9. Зависимость дисперсии пик-фактора многочастотных сигналов от коэффициента передискретизации при различном количестве поднесущих и способах модуляции:
а – OFDM, КАМ-4; *б* – SEFDM, КАМ-64, $\alpha = 1/2$

Fig. 9. PAPR variance of multicarrier signals vs upsampling factor for various number of subcarriers and modulation schemes:
а – OFDM, КАМ-4; *б* – SEFDM, КАМ-64, $\alpha = 1/2$

раз. Дальнейшее увеличение размерности ОБПФ не влечет существенного выигрыша в точности расчета пик-фактора.

На рис. 9 представлены зависимости выборочной дисперсии пик-фактора OFDM- и SEFDM-сигналов от коэффициента передискретизации. По полученным зависимостям видно, что для низкого числа информационных поднесущих (5, 10) выборочная дисперсия пик-фактора почти не изменяется при всех значениях коэффициента передискретизации. Для большего числа поднесущих выборочная дисперсия почти перестает изменяться при коэффициенте передискретизации $K > 4$.

Заключение

Предложен алгоритм расчета выборочного среднего и дисперсии пик-фактора OFDM- и SEFDM-сигналов на основе применения ОБПФ повышенной размерности (передискретизация). Так как пик-фактор является случайной величиной, в разработанном алгоритме генерировалась выборка из N_{exp} многочастотных символов, для которых рассчитывались среднее выборочное значение пик-фактора и выборочная дисперсия.

Получены зависимости выборочного среднего и выборочной дисперсии пик-фактора от размера выборки для разного числа поднесущих, способов модуляции и коэффициента уплотнения. Как для OFDM-, так и для SEFDM-сигналов зависимости выходят в насыщение при количестве экспериментов $N_{exp}=10^3-10^4$.

Также получены зависимости выборочного среднего и выборочной дисперсии пик-фактора от коэффициента передискретизации. Необходимость повышать частоту дискретизации и увеличивать размерность ОБПФ обусловлена большой ошибкой при расчете на исходной частоте дискретизации (до 1 дБ по сравнению с непрерывными сигналами). Показано, что независимо от способа модуляции и числа поднесущих повышение размерности ОБПФ в четыре раза и вычислительной сложности в 4,8 раза позволяет уточнить результат расчета среднего пик-фактора на ~0,5 дБ для OFDM-сигналов и на ~1 дБ для SEFDM-сигналов с коэффициентом уплотнения 1/2. Дальнейшее увеличение частоты дискретизации существенного увеличения точности не дает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Darwazeh T. Xu, Gui T., Bao Y., Li Z.** Optical SEFDM-system. Bandwidth saving using non-orthogonal sub-carriers // IEEE Photonics Technology Letters. 2014. Vol. 26. No. 4. Pp. 352–355.

2. **Kislitsyn A.B., Rashich A.V., Tan N.N.** Generation of SEFDM-signals using FFT/IFFT // Proc. of the NEW2AN 2014 and 7th Conf. 2014. Pp. 488–501.

3. **Fadeev D.K., Rashich A.V.** Optimal input power backoff of a nonlinear power amplifier for SEFDM-system // Proc. of the NEW2AN 2015 and 8th Conf. 2015. Pp. 669–678.

4. **Anas Tom** Suppressing alignment: joint PAPR and out-of-band power leakage reduction for OFDM-based systems. Department of Electrical Engineering, University of South Florida, Tampa, FL, 2016.

5. **Safa Isam, Izzat Darwazeh** Peak to average power ratio reduction in spectrally efficient FDM systems // Proc. of the 18th Internat. Conf. on Telecommunications. 2011.

6. **Jia Min, Wu Zhiying, Guo Qing, Gu Xuemai, Zhang Naitong.** Peak to average power ratio suppression method joint orthogonal and non-orthogonal scheme // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications Workshops. 2017 Infocom 5G & Beyond Workshop.

7. **Zavjalov S.V., Makarov S.B., Volvenko S.V., Balashova A.A.** Efficiency of coherent detection algorithms nonorthogonal multifrequency signals based on modified decision diagram // 15th International Conf. on Next-Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems, NEW2AN 2015 and 8th Conf. on Internet of Things and Smart Spaces, ruSMART 2015.

8. **Zavjalov S.V., Makarov S.B., Volvenko S.V., De Yuan S.** Possibilities of "Nyquist barrier" breaking by optimal signal selection // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2016. 9870 LNCS. Pp. 612–619.

Статья поступила в редакцию 13.07.2018.

REFERENCES

1. **Darwazeh T. Xu, Gui T., Bao Y., Li Z.** Optical SEFDM-system. Bandwidth saving using non-orthogonal sub-carriers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, Vol. 26, No. 4, Pp. 352–355.

2. **Kislitsyn A.B., Rashich A.V., Tan N.N.** Generation of SEFDM-signals using FFT/IFFT. *Proceedings of the NEW2AN 2014 and 7th Conference*, Aug. 2014, Pp. 488–501.

3. **Fadeev D.K., Rashich A.V.** Optimal input power backoff of a nonlinear power amplifier for SEFDM-system. *Proceedings of the NEW2AN 2015 and 8th Conference*, Aug. 2015, Pp. 669–678.

4. **Anas Tom** *Suppressing alignment: Joint PAPR and out-of-band power leakage reduction for OFDM-based systems.* Department of Electrical Engineering, University of South Florida, Tampa, FL, June 2016.

5. **Safa Isam, Izzat Darwazeh** Peak to average power ratio reduction in spectrally efficient FDM systems. *Proceedings of the 18th International Conference on Telecommunications*, 2011.

6. **Jia Min, Wu Zhiying, Guo Qing, Gu Xuemai, Zhang Naitong.** Peak to average power ratio suppression method joint orthogonal and non-orthogonal scheme. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications Workshops: 2017 IEEE Infocom 5G & Beyond Workshop.*

7. **Zavjalov S.V., Makarov S.B., Volvenko S.V., Balashova A.A.** Efficiency of coherent detection algorithms non-orthogonal multifrequency signals based on modified decision diagram. *Proceedings of the 15th International Conference on Next-Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems, NEW2AN 2015 and 8th Conference on Internet of Things and Smart Spaces, ruSMART 2015.*

8. **Zavjalov S.V., Makarov S.B., Volvenko S.V., De Yuan S.** Possibilities of "Nyquist barrier" breaking by optimal signal selection. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2016, 9870 LNCS, Pp. 612–619.

Received 13.07.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

РАШИЧ Андрей Валерьевич
RASHICH Andrey V.
E-mail: andrey.rashich@gmail.com

НГУЕН Тан Нгок
NGUEN Tan N.
E-mail: ngoctan1610@yahoo.com

САЛЬНИКОВ Валентин Андреевич
SALNIKOV Valentin A.
E-mail: valyentin129@gmail.com

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

DOI: 10.18721/JCSTCS.11305
УДК 621.391.2

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ ДАТЧИКАМИ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ НАВЕДЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ АРКТИЧЕСКИХ ГЕОМАГНИТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИЕМА СИГНАЛОВ

В.И. Лютин[1], Е.Н. Десятирикова[2], В.Е. Белоусов[2]

[1] Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация;

[2]Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация

С применением теории нелинейной фильтрации условных марковских процессов синтезирован квазилинейный алгоритм автоматического наведения беспилотного летательного аппарата, на основе которого определен способ объединения результатов наблюдений в различных физических полях и диапазонах длин волн собственных и отраженных излучений. Показано, что в комплексированных системах автоматического слежения оптимальный способ объединения результатов наблюдения заключается в формировании единого сигнала управления поворотом совмещенной оптической оси вслед за объектом как результата весового суммирования сигналов рассогласований, вырабатываемых каждой из систем наблюдения, с использованием в качестве весовых коэффициентов вероятностей обнаружения объекта. На основе полученного алгоритма в гауссовском приближении установлены потенциальные возможности по точности наведения автоматической комплексированной системой датчиков. Обнаружен синергический эффект: совместным наблюдением нескольких датчиков с невысокими показателями качества возможно слежение за плохо видимым или преднамеренно замаскированным объектом.

Ключевые слова: комплексирование результатов наблюдений, автоматическое слежение, точность слежения, теория нелинейной фильтрации, отношение правдоподобия, вероятность обнаружения.

Ссылка при цитировании: Лютин В.И., Десятирикова Е.Н., Белоусов В.Е. Комплексирование результатов наблюдения датчиками различных физических полей при автоматическом наведении беспилотных летательных аппаратов с учетом арктических геомагнитных особенностей приема сигналов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 3. С. 49–56. DOI: 10.18721/JCSTCS.11305

INTEGRATING RESULTS FROM OBSERVATION BY SENSORS OF VARIOUS PHYSICAL FIELDS WITH AUTOMATIC GUIDANCE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TAKING INTO ACCOUNT ARCTIC GEOMAGNETIC FEATURES OF RECEIVING SIGNALS

V.I .Lutin[1], E.N. Desyatirikova[2], V.E. Belousov[2]

[1]Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation;
[2]Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

Applying the theory of nonlinear filtration of conditioned Markov processes, we have synthesized a quasilinear algorithm for automatically directing an unmanned aerial vehicle, used to combine the results of observations in various physical fields and wavelength ranges for own and reflected radiation is determined. It is shown that the optimal way of combining the observation results in integrated automatic tracking systems is forming a single control signal by rotating the combined optical axis following the object, as a result of weight summation of the discrepancy signals produced by each of the observation systems, using the probabilities of object detection as weight coefficients. Based on the algorithm obtained, we have established potential possibilities for the accuracy of guidance of automatic sensors integrated by the system in the Gaussian approximation. A synergetic effect has been discovered, namely, thatit is possible to track a poorly visible or intentionally disguised object by joint observation with several sensors with low quality indicators.

Keywords: integration of the results of observations, automatic tracking, tracking accuracy, the theory of nonlinear filtration, likelihood ratio, probability of detection.

Citation: Lutin V.I., Desyatirikova E.N., Belousov V.E. Integrating results from observation by sensors of various physical fields with automatic guidance of unmanned aerial vehicles taking into account Arctic geomagnetic features of receiving signals. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 3, Pp. 49–56. DOI: 10.18721/JCSTCS.11305

Введение

Всё возрастающее применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для доставки грузов, в частности, в труднодоступных и малонаселенных местностях, к каковым относятся арктические области, в автоматическом режиме и при действии преднамеренных помех со стороны конкурентов и получателя, приводит к необходимости повышения точности и помехозащищенности автоматических систем слежения за областью пространства, где расположен получатель груза или интересующий объект. В связи с этим актуально использование информации о пространственно-энергетических характеристиках объектов и фонов, получаемой различными способами при наблюдении собственных и/или отраженных излучений объекта, а также в различных участках спектра электромагнитного излучения: ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном, радиоволновом [1]. При этом изображение просматриваемой области пространства не интерпретируется как обычный зрительный образ, воспринимаемый человеком, а является трех-, четырех- и более мерным образом, пригодным для машинного восприятия и представляющим собой добываемую всеми доступными средствами совокупность сведений об окружающих наблюдателя объектах. Стремление к использованию результатов наблюдений объекта в различных участках спектра электромагнитного излучения приводит к необходимости разработки комплексированных систем, в составе которых применяются телевизионные, тепловизионные, радиолокационные и другие средства формирования изображений [2, 3]. Для повышения точности вывода БЛА оснащаются инерциальной навигационной системой (ИНС) [2], корректируемой по сигналам от системы глобального позиционирования (GPS) [2, 3], но при действии полярных сияний эффективность GPS снижается [4].

Цель работы – установление принципа построения и определение потенциальной точности слежения систем автоматического наведения БЛА с комплексированием средств слежения в различных физических полях и диапазонах длин волн собственных и отражённых излучений.

Формализация задачи и алгоритма решения

Автоматическое слежение заключается в совмещении оптической оси комплексированной системы датчиков с линией визирования объекта. По величине углов отклонения оптической оси датчиков от строительной оси БЛА в вертикальной и горизонтальной плоскостях вырабатываются команды корректировки движения БЛА.

Методом решения подобных задач является применение теории нелинейной фильтрации дискретных и непрерывных марковских процессов [5, 6]. При этом характер изменений вида объекта в каждом из каналов наблюдения, обусловленный поворотами и преднамеренными видоизменениями наблюдаемого объекта, описывается марковской цепью, причем сами виды объекта и их число заранее заданы, а характер изменения единых для изображений во всех каналах наблюдения непрерывных параметров – угловых отклонений линии визирования от оптической оси в двух взаимно перпендикулярных плоскостях – от кадра к кадру в силу медленности их изменения описывается гауссовской марковской последовательностью.

Примем, что наблюдение объекта ведется в N каналах, каждый из которых соответствует одному из физических полей, а совмещение линии визирования и оптической оси нужно выполнить в одной плоскости. Пусть смена значений дискретного параметра описывается последовательностью с независимыми состояниями с равными одношаговыми условными вероятностями перехода $\pi_m(\mu_k^{(n)} \mid \mu_{k-1}^{(n)}) = 1/M_n$, где M_n – число различаемых дискретных параметров; $\mu^{(n)} = \overline{1, M_n}$ – значения дискретных параметров, определяющих вид наблюдаемого объекта в n-ом канале наблюдения, $n = \overline{1, N}$. Априорное рекуррентное стохастическое уравнение для изменений непрерывного параметра в дискретном времени имеет следующий вид:

$$\lambda_k = R_\lambda \lambda_{k-1} + \sigma_\lambda \sqrt{1 - R_\lambda^2} \cdot \xi_k,$$

где R_λ – коэффициент корреляции значений параметра на соседних шагах; σ_λ^2 – априорная дисперсия параметра; ξ_k – последовательность стандартных нормальных чисел.

Будем считать, что в каждом канале на фоне аддитивного гауссовского шума наблюдаются последовательности изображений объекта и прилегающего фона на плоскости $\{s_{ijk}^{(n)}(\lambda_k, \mu_k^{(n)}),\ i = \overline{1, I},\ j = \overline{1, J},\ n = \overline{1, N}\}$

$$y_{ijk}^{(n)} = s_{ijk}^{(n)}(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) + n_{ijk}^{(n)},$$

где $n_{ijk}^{(n)}$ – отсчеты белых шумов с дисперсиями σ_n^2; i, j – номера элементов изображений; I_n, J_n – размеры изображений в каждом из n каналов наблюдения.

В силу независимости шумов функция правдоподобия параметров записывается в виде [5, 6]:

$$L(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = \prod_{m=1}^{M_n} \prod_{i=1}^{I_n} \prod_{j=1}^{J_n} w\{y_{ijk}^{(n)} - s_{ijk}^{(m)}(\lambda_k, \mu_k^{(m)})\},$$
$$n = \overline{1, N},$$

где $w(\bullet)$ – плотности распределения вероятностей значений отсчетов шумов, μ_k, $n = \overline{1, N}$ – значения дискретных параметров в N каналах наблюдения на k-ом шаге.

Тогда логарифм одношаговой функции правдоподобия (ЛОФП) записывается в виде

$$\Pi_k(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = \sum_{m=1}^{M_n} \Pi_{km}(\lambda_k, \mu_k^{(m)}),\ n = \overline{1, N}.$$

При гауссовском характере шумов и в случае неэнергетических параметров ЛОФП записывается в виде [5–7]:

$$\Pi_k(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = \sum_{m=1}^{M_n} \sigma_n^{-2} \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} y_{ijk}^{(n)} \cdot s_{ijk}^{(m)}(\lambda_k, \mu_k^{(m)}),$$
$$n = \overline{1, N}.$$

Финальное апостериорное совместное распределение вероятностей параметров $\lambda_k, \mu_k^{(n)}$, $n = \overline{1, N}$ равно

$$w_{ps}(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = h_k \cdot \exp\{\Pi_k(\lambda_k, \mu_k^{(n)})\} \times$$
$$\times\ w^э(\lambda_k, \mu_k^{(n)}),\ n = \overline{1, N}, \qquad (1)$$

где

$$h_k^{-1} = \sum_{n=1}^{N} \int_{\{\lambda_k\}} \exp\{\Pi_k(\lambda_k, \mu_k^{(n)})\} \cdot w^э(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) d\lambda_k$$ –

постоянная нормировки.

Входящая в это выражение экстрапо-

лированная плотность вероятности непрерывного параметра равна

$$w^{э}(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = \int\limits_{\{\lambda_{k-1}\}} \prod_{m=1}^{M_n} w(\lambda_k, \mu_k^{(m)} \,|\lambda_{k-1}, \mu_{k-1}^{(m)}) \times \\ \times\, w_{ps}(\lambda_{k-1}, \mu_{k-1}^{(m)}) d\lambda_{k-1}, n = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где

$$w(\lambda_k, \mu_k^{(m)} \,|\lambda_{k-1}, \mu_{k-1}^{(m)}) = \\ = w(\lambda_k \,|\lambda_{k-1}) p(\mu_{k-1}^{(m)}) \pi(\mu_k^{(m)} \,|\mu_{k-1}^{(m)}),$$

$p(\mu_{k-1}^{(m)})$, $m = \overline{1, N}$ – апостериорные вероятности дискретных параметров в m каналах на $(k-1)$-ом шаге.

Решение о значениях параметров μ_k, $k = \overline{1, N}$ и λ_k принимается по критерию максимума апостериорных вероятностей:

$$P_{ps}(\mu_k^{(n)}) = \int\limits_{-\infty}^{\infty} w_{ps}(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) w(\lambda_k) d\lambda_k,$$

$$\hat{\mu}_k = \arg\max_n P_{ps}(\mu_k^{(n)}).$$

При малом уровне собственных шумов в случае медленных изменений непрерывного параметра (постоянного в каждом кадре), безусловное финальное апостериорное распределение вероятностей непрерывного параметра $w_{ps}(\lambda_k) = \sum_{n=1}^{N} w_{ps}(\lambda_k, \mu_k^{(n)})$ целесообразно искать в виде гауссовского закона [6, 8], в котором апостериорное среднее m_k является оценкой непрерывного параметра $\hat{\lambda}_k = m_k$, а апостериорная дисперсия d_k характеризует точность слежения.

С применением разложения ЛОФП в ряд Тейлора по непрерывному параметру в окрестности значения $\lambda_k^{э} = R_\lambda \cdot \hat{\lambda}_{k-1}$, соответствующего максимуму экстраполированной плотности вероятности непрерывного параметра, из выражений (1) и (2) получается алгоритм фильтрации в виде трех уравнений для апостериорной вероятности дискретного параметра, оценки и дисперсии оценки непрерывного параметра:

$$P_{ps}(\mu_k^{(n)}) = C_k \cdot \prod_{m=1}^{M_n} \Bigg[\exp\{\Pi_k(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(m)})\} \times \\ \times \sqrt{\chi_k(\mu_k^{(m)}) \cdot D^{-1}} \exp\left\{ \frac{1}{2} \cdot \chi_k(\mu_k^{(m)}) \times \right. \\ \left. \times [\Pi'_\lambda(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(m)})]^2 \right\} \Bigg], \quad n = \overline{1, N},$$

$$\hat{\lambda}_k = \lambda_k^{э} + \sum_{n=1}^{N} \pi_n(\mu_{kn} \,|\, \mu_{k-1n}) \cdot \chi_k(\mu_k^{(n)}) \times \\ \times \sum_{m=1}^{M_n} P_{ps}(\mu_k^{(m)}) \cdot \Pi'_\lambda(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(n)}), \quad (3)$$

$$d_k = C_k \cdot \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{M_n} \frac{\exp\{\Pi(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(m)})\}}{\sqrt{\chi_k(\mu_k^{(n)}) D^{-1}}} \times \\ \times \exp\left\{ \frac{1}{2} \cdot \chi_k(\mu_k^{(n)}) \cdot [\Pi'_\lambda(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(m)})]^2 \right\} \times \\ \times [(\chi_k(\mu_k^{(n)}) \cdot \Pi'_\lambda(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(m)}) + \lambda_k^{э} - \hat{\lambda}_k)^2 + \\ + \chi_k(\mu_k^{(n)})],$$

где C_k – постоянная нормировки; $d_0 = (1 - R_\lambda^2)\sigma_\lambda^2$ – дисперсия плотности вероятности перехода; $D = d_0 + R_\lambda^2 d_{k-1}$ – дисперсия экстраполированной оценки непрерывного параметра; $\Pi'_\lambda(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(n)})$ – производная от ЛОФП; $\chi_k(\mu_k^{(n)}) = D / [1 - D \cdot \bar{\Pi}''_{\lambda\lambda}(\lambda_k^{э}, \mu_n)]$ – кумулянт экстраполированного распределения вероятностей непрерывного параметра; $\bar{\Pi}''_{\lambda\lambda}(\lambda_k^{э}, \mu_k) = -q_{\mu k} \cdot R''_{\lambda\lambda}(0, \mu_k)$ – сигнальная часть второй производной ЛОФП [1]; $q_{\mu k}$ – отношение сигнал/шум; $R''_{\lambda\lambda}(0, \mu_k)$ – вторая производная от функции корреляции наблюдаемого изображения.

Минимальные значения величин $\chi_k(\mu_k^{(n)})$ равны D, поэтому для упрощения алгоритмов величина $\chi_k(\mu_k^{(n)})$ принимается одинаковой и равной κ_n для всех значений дискретного параметра каждого канала и соответствующей стационарному режиму наблюдения, наступающему после захвата объекта на автосопровождение. Тогда алгоритм (3) принимает вид:

$$\hat{\lambda}_k = \lambda_k^{э} + \sum_{n=1}^{N} \kappa_n \cdot \sum_{m=1}^{M_n} P_{ps}(\mu_k^{(m)}) \cdot \Pi'_\lambda(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(m)}). \quad (4)$$

Апостериорные вероятности дискретных параметров равны [7]:

$$P_{ps}(\mu_k^{(n)}) \cong \exp\{\Pi_k(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(m)})\} \times \\ \times \left[\sum_{m=1}^{M_n} \exp\{\Pi_k(\lambda_k^{э}, \mu_k^{(m)})\} \right]^{-1}, \quad n = \overline{1, N}.$$

Оценка непрерывного параметра формируется как весовая сумма сигналов рас-

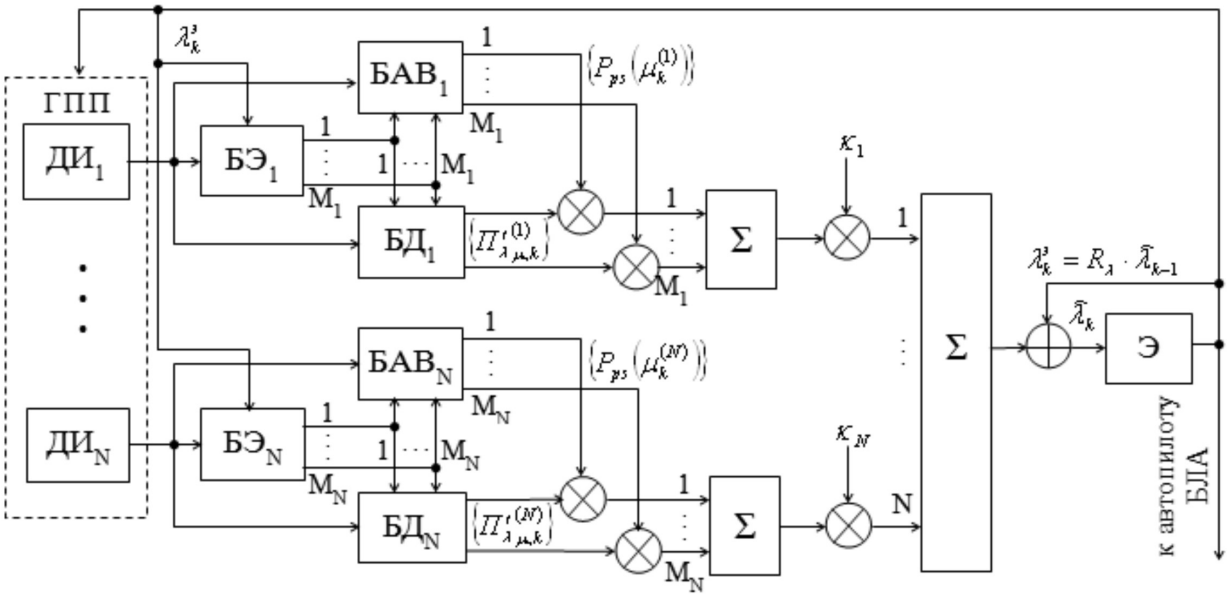

Рис. 1. Структурная схема комплексированной системы автоматического слежения

Fig. 1. Block diagram of the integrated automated tracking system

согласования с весами, равными апостериорным вероятностям обнаружения объекта в различных физических полях [8, 9].

Структура системы слежения

Структурная схема синтезированной системы приведена на рис. 1.

На рисунке обозначено: $ДИ_n$, $n = \overline{1, N}$ – датчики изображений, один из которых от системы GPS; ГПП – гиростабилизированная поворотная платформа; $БД_n$ – блоки дискриминаторов; $БЭ_n$ – банки эталонных изображений; $БАВ_n$ – блоки апостериорных вероятностей; Σ – сумматоры; Э – экстраполятор. Отличительная особенность синтезированной структурной схемы заключается в её замкнутости как системы автоматического управления с обратной связью по решению, чего не удается получить, используя теорию оценивания непрерывных параметров [10]. Техническая реализация системы возможна лишь с применением компьютерных технологий обработки результатов наблюдений, что требует отдельного рассмотрения.

Анализ точности системы слежения

Потенциальная точность слежения определена при допущении, что в каждом из каналов наблюдается объект с постоянным контрастом на равномерном фоне и обнаруживается с вероятностью P_n [*]:

$$P_n = 0,5 - \Phi_0(\Phi_0^{-1}(F - 0,5) - q_n),\ n = \overline{1, N}, \quad (5)$$

где $\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\{-t^2/2\}dt$ – нормированная функция ошибок; q_n – параметр обнаружения объекта; F – вероятность ложной тревоги.

Параметр обнаружения объекта комплексированной системой датчиков равен [7]:

$$q = \sum_{n=1}^{N} q_n. \quad (6)$$

Вероятность обнаружения объекта комплексированной системой датчиков изображений P определяется подстановкой (6) в (5) вместо q_n.

Точность слежения определяется из рекуррентного уравнения для апостериорной дисперсии оценивания непрерывного па-

[*] **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 11-е изд. стер. М.: КНОРУС, 2010. 664 с.

раметра d_k, которое с введением понятия относительной апостериорной дисперсии $\delta_k^2 = d_k / \sigma_\lambda^2$, где $\sigma_\lambda^2 = (\alpha_0 \cdot L)^2$ – априорная дисперсия непрерывного параметра при среднеквадратическом угловом отклонении α_0 неуправляемого полёта БЛА (при не работающих GPS и других датчиках) и дальности пуска L, примет вид [9]:

$$\delta_k^2 = \frac{P}{[1 + R_\lambda^2(\delta_{k-1}^2 - 1)]^{-1} + z} + \frac{1 - P}{[1 + R_\lambda^2(\delta_{k-1}^2 - 1)]^{-1}}, \quad (7)$$

где $z = \sigma_\lambda^2 q$ – обобщённый параметр обнаружения объекта комплексированной системой.

Вероятность удержания оптической оси комплексированной системы слежения в пределах видимой проекции объекта равна [8]:

$$P_c = [0,5 - \Phi_0(\Delta\varphi_g / (\sigma_\lambda \cdot \delta))] \times \times [0,5 - \Phi_0(\Delta\varphi_v / (\sigma_\lambda \cdot \delta))], \quad (8)$$

где $\Delta\varphi_g, \Delta\varphi_v$ – угловые размеры видимой проекции объекта; δ – стационарное решение уравнения (7).

Если в одном из каналов, например в канале приема сигналов GPS, известна вероятность обнаружения объекта (сигнала GPS) P_N, то из выражения (5) при вероятности ложной тревоги F_N определяется параметр обнаружения $q_N = \Phi_0^{-1}(F_N - 0,5) - \Phi_0^{-1}(0,5 - P_N)$.

На рис. 2 приведены зависимости ошибок системы слежения Δ от параметра q и вероятности P обнаружения объекта при различных дальностях наблюдения L комплексированной системой датчиков. При расчете ошибок слежения $\Delta = \delta\sigma_\lambda$ с применением рекуррентного выражения (7) принято, что $\alpha_0 = 5$ мрад (реальный увод на 1...2 км при полёте длительностью час на дальность 1000 км за счет отклонения оси не корректируемого гироскопа из-за вращения Земли), $R_\lambda = 0,99$, $F = 0,01$.

Увеличение параметра обнаружения объекта более 7 не приводит к снижению ошибок слежения, следовательно, ухудшение условий наблюдения объекта в каждом из каналов парируется увеличением числа каналов наблюдения [11]. Поэтому для сохранения работоспособности комплексированной системы датчиков необходимо всемерно повышать параметр и вероятность обнаружения каждым из датчиков.

Основным ограничением применения средств наблюдения каждого из каналов является дальность, поэтому особенность комплексированных систем нередко заклю-

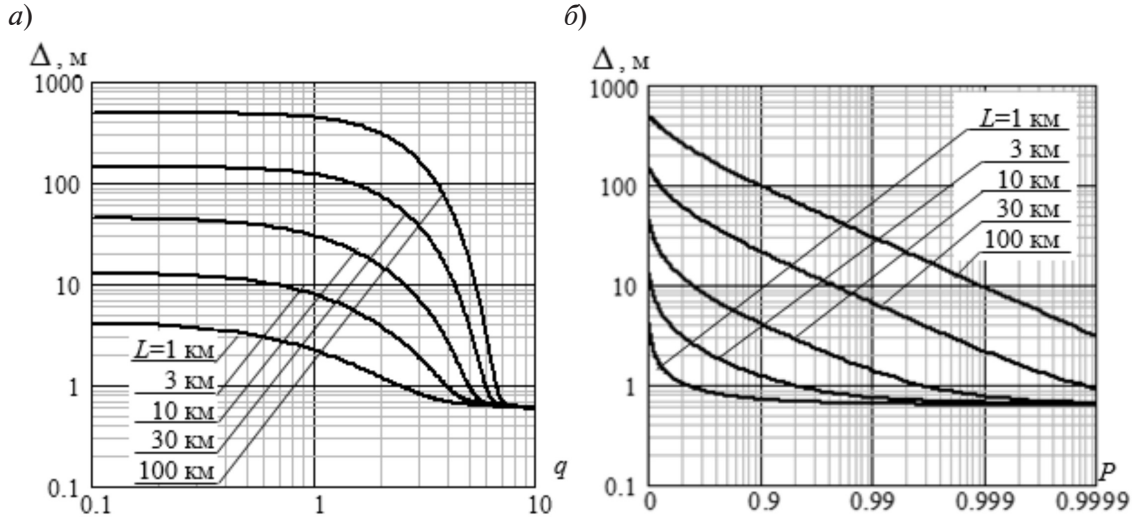

Рис. 2. Зависимости ошибок слежения при различных дальностях наблюдения:
а – от параметра обнаружения объекта; *б* – от вероятности обнаружения объекта

Fig. 2. Dependencies of tracking errors at different observation ranges:
a – on the object detection parameter; *b* – the probability of detection of the object

чается в использовании каждого из каналов поочередно.

Заключение

В комплексированных системах автоматического слежения оптимальный способ объединения результатов наблюдения заключается в формировании единого сигнала управления поворотом совмещенной оптической оси вслед за объектом как результата весового суммирования сигналов рассогласований, вырабатываемых каждой из систем наблюдения, с использованием в качестве весовых коэффициентов вероятностей обнаружения объекта. Существует значение параметра обнаружения, при котором точность вывода БЛА не зависит от дальности наблюдения объекта, а значит, можно произвести размен числа каналов наблюдения на качество обнаружения объекта в каждом из них. В этом заключается синергетический эффект: совместным наблюдением нескольких датчиков с невысокими показателями качества возможно слежение за плохо видимым или преднамеренно замаскированным объектом, чего нельзя достичь при использовании одного высококачественного датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ярлыков М.С.** Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985. 345 с.

2. **Борисов Е.Г., Евдокимов В.И.** Высокоточное оружие и борьба с ним. СПб.: Изд-во «Лань», 2013. 496 с.

3. **Юхно П.М.** Преднамеренные оптические помехи высокоточному оружию. М.: Радиотехника, 2017. 640 с.

4. **Черноус С.А.** Навигация GPS/ГЛОНАСС в Арктике и полярные сияния // Вестник Мурманского государственного университета. 2016. Т. 19. № 4. С. 806–812.

5. **Амиантов И.Н.** Избранные вопросы статистической теории связи. М.: Сов. радио, 1971. 416 с.

6. **Тихонов В.И., Кульман Н.К.** Нелинейная фильтрация и квазикогерентный приём сигналов. М.: Сов. радио, 1976. 704 с.

7. **Лютин В.И.** Технология комплексирования тепловизионных и радиометрических изображений в задачах распознавания объектов // Радиотехника. Наукоёмкие технологии. 2003. № 11-12. С. 3–6.

8. **Lutin V.I., Mager V.E., Desyatirikova E.N.** The processing of signals from sensors to observe objects in various physical fields // Proc. of the IEEE ElConRus. St. Petersburg, Moscow, 2018. Pp. 1132–1137.

9. **Лютин В.И.** Алгоритм автоматического слежения при наблюдении объектов в различных физических полях // Радиосистемы. 2001. № 10. С. 33–36.

10. **Лютин В.И.. Десятирикова Е.Н., Макеева О.Б.** Достоверность обработки сигналов от датчиков наблюдения объектов в различных физических полях // Теория и техника радиосвязи. 2018. Вып. 1. С. 58–65.

11. **Lutin V.I., Shipilova E.A., Chernenkaya L.V., Mager V.E., Desyatirikova E.N., Makeeva O.B.** The effectiveness of complex signal processing from object observation sensors in various physical fields // Proc. of the 21st IEEE International Conf. on Soft Computing and Measurements, SCM 2018. St. Petersburg, Moscow, 2018. Pp. 77–80.

Статья поступила в редакцию 11.07.2018.

REFERENCES

1. **Yarlykov M.S.** *Statisticheskaya teoriya radionavigatsii* [*Statistical theory of radio navigation*]. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1985, 345 p. (rus)

2. **Borisov Ye.G., Yevdokimov V.I.** *Vysokotochnoye oruzhiye i borba s nim* [*Precision weapons and the fight against it*]. St. Petersburg: Lan Publ., 2013, 496 p. (rus)

3. **Yukhno P.M.** *Prednamerennyye opticheskiye pomekhi vysokotochnomu oruzhiyu* [*Intentional optical interference to high-precision weapons*]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2017, 640 p. (rus)

4. **Chernous S.A.** Navigatsiya GPS/GLONASS v Arktike i polyarnyye siyaniya [Navigation GPS/GLONASS in the Arctic and the Aurora]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, Vol. 19, No. 4, Pp. 806–812. (rus)

5. **Amiantov I.N.** *Izbrannyye voprosy statisticheskoy teorii svyazi* [*Selected questions of the statistical theory of communication*]. Moscow: Sov. Radio Publ., 1971, 416 p. (rus)

6. **Tikhonov V.I., Kulman N.K.** *Nelineynaya filtratsiya i kvazikogerentnyy priyem signalov* [*Nonlinear filtering and quasi-coherent signal reception*]. Moscow: Sov. Radio Publ., 1976, 704 p. (rus)

7. **Lutin V.I.** Tekhnologiya kompleksirovaniya teplovizionnykh i radiometricheskikh izobrazheniy v

zadachakh raspoznavaniya obyektov [Technology of integration of thermal imaging and radiometric images in object recognition problems]. *Radiotekhnika. Naukoyemkiye tekhnologii*, 2003, No. 11–12, Pp. 3–6. (rus)

8. **Lutin V.I., Mager V.E., Desyatirikova E.N.** The processing of signals from sensors to observe objects in various physical fields. *Proceedings of the IEEE ElConRus*, St. Petersburg and Moscow, Russia, 2018, Pp. 1132–1137.

9. **Lutin V.I.** Algoritm avtomaticheskogo slezheniya pri nablyudenii obyektov v razlichnykh fizicheskikh polyakh [The algorithm of automatic tracking when observing objects in different physical fields]. *Radiosistemy*, 2001, No. 10, Pp. 33–36. (rus)

10. **Lutin V.I., Desyatirikova E.N., Makeeva O.B.** Dostovernost obrabotki signalov ot datchikov nablyudeniya obyektov v razlichnykh fizicheskikh polyakh [Reliability of signal processing from object observation sensors in various physical fields]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2018, Vol. 1, Pp. 58–65. (rus)

11. **Lutin V.I., Shipilova E.A., Chernenkaya L.V., Mager V.E., Desyatirikova E.N., Makeeva O.B.** The effectiveness of complex signal processing from object observation sensors in various physical fields, *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements*, St. Petersburg and Moscow, Russia, 2018, Pp. 77–80.

Received 11.07.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЛЮТИН Владимир Иванович
LUTIN Vladimir I.
E-mail: science2000@ya.ru

ДЕСЯТИРИКОВА Елена Николаевна
DESYATIRIKOVA Elena N.
E-mail: science2000@ya.ru

БЕЛОУСОВ Вадим Евгеньевич
BELOUSOV Vadim E.
E-mail: science2000@yandex.ru

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

Инфокоммуникационные технологии в образовании

DOI: 10.18721/JCSTCS.11306
УДК 004.8

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПРОВЕРКИ ОТВЕТОВ НА ОТКРЫТЫЕ ВОПРОСЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

В.А. Кожевников, О.Ю. Сабинин

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

Рассмотрены системы автоматической проверки открытых ответов на естественном языке и описаны требования, предъявляемые к подобным системам. Предложена функциональная схема системы и изучены вопросы ее реализации. В качестве лингвистического процессора разработанной системы выбрана система извлечения информации из текстов Томита-парсер компании Яндекс. Написаны грамматические правила извлечения сущностей из текстов на русском языке и предложен алгоритм анализа ответов. При оценивании каждого ответа можно задать веса для каждой сущности и для каждого из имеющихся эталонных ответов, что позволяет производить настройку системы. Система реализована и протестирована при проверке ответов студентов.

Ключевые слова: система тестирования, обработка текста на русском языке, компьютерная лингвистика, извлечение информации, открытые вопросы, краткие развернутые ответы, Томита-парсер.

Ссылка при цитировании: Кожевников В.А., Сабинин О.Ю. Система автоматической проверки ответов на открытые вопросы на русском языке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 3. С. 57–72. DOI: 10.18721/JCSTCS.11306

SYSTEM OF AUTOMATIC VERIFICATION OF ANSWERS TO OPEN QUESTIONS IN RUSSIAN

V.A. Kozhevnikov, O.Yu. Sabinin

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

The paper considers systems of automatic verification of open answers in natural language and describes the requirements for such systems. The article proposes a functional scheme of such a system and discusses its implementation. The Tomita-parser by Yandex for extracting information from texts was chosen as a linguistic processor of the developed system. Grammatical rules for extracting entities from texts in Russian are written and an algorithm for analyzing the answers is proposed. Weights can be set for each entity and for each of the available reference responses when evaluating each response, allowing to customize the system. The system is implemented and tested by checking students' answers.

Keywords: testing system, text processing in Russian language, computational linguistics, information extraction, open question, short answer, Tomita parser, Natural Language Processing.

Citation: Kozhevnikov V.A., Sabinin O.Yu. System of automatic verification of answers to open questions in Russian. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 3, Pp. 57–72. DOI: 10.18721/JCSTCS.11306

Введение

Процесс обучения в любом образовательном учреждении подразумевает проверку усвоения учащимися полученных знаний. Такая проверка важна для обратной связи и последующей корректировки процесса обучения.

Одним из эффективных видов проверки знаний студентов является тестирование, играющее очень важную роль при оценивании результатов обучения. Если при классическом («аудиторном») образовании тестирование может быть как основным, так и вспомогательным инструментом проверки знаний, то при набирающем все больший вес дистанционном обучении компьютерное тестирование – практически единственный способ контроля усвоения знаний.

Как показывают наша практика и различные исследования (например, [1, 2]), наиболее эффективный метод тестирования – тестирование с помощью открытых вопросов (т. е. вопросов, где отвечающий дает развернутый или короткий ответ на естественном языке). При таком виде тестирования практически полностью исключается возможность угадывания правильного ответа, а от студента требуется умение не просто вспомнить термин или определение, но и корректно сформулировать свои мысли.

Однако на практике компьютерное тестирование ограничивается вопросами, в которых формат ответов жестко задан, а вопросы, требующие ответа на естественном языке, считаются непригодными для автоматизированного тестирования из-за сложностей обработки. Так, для использующейся во многих вузах системы тестирования (например, на базе платформы Moodle) возможны вопросы, требующие ввода текста на естественном языке, но система просто проверяет посимвольное совпадение введенного текста с эталонным ответом, введенным преподавателем. И такие ответы приходится проверять вручную преподавателям.

Преимущества систем автоматизированного оценивания ответов на открытые вопросы по сравнению с классической проверкой преподавателем:

- уменьшение времени проверки – система позволяет сразу оценить результаты тестирования,
- увеличение объективности оценивания – автоматизированное оценивание позволяет снизить ошибки из-за усталости или невнимательности и убрать возможные претензии студентов из-за предвзятого отношения.

Анализ существующих систем тестирования с помощью открытых вопросов

Существующие системы тестирования с помощью открытых вопросов можно разделить на несколько категорий, в зависимости от используемых методов работы с текстом [1].

К первой категории относятся системы, основанные на сопоставлении концепций (Concept Mapping). В таких системах, как правило, ответы тестируемого и эталонные ответы разбиваются на некоторые списки ключевых понятий (так называемых минимальных концепций), и либо подсчитывается общее количество концепций для выставления оценки, либо во время оценивания рассматривается только одна каким-то образом выбранная концепция. Каждой концепции можно приписать некий вес, и тогда в итоговой оценке учитываются эти веса.

Одной из первых таких работ была система [3], в которой вопросы рассматривались как гипотезы, и отвечающим необхо-

димо было дать несколько объяснений для данных гипотез, каждая из которых могла соответствовать или не соответствовать одному из ответов учителя. Тестируемых просили написать до 15 ответов (гипотез) для объяснения одного явления (длиной до 15 слов). Каждый ответ рассматривался как отдельная концепция. Применялся метод LCS (Lexical Conceptual Structure) из [4], в котором основанная на концепциях лексика и общая грамматика получаются из заранее подготовленного перед тестированием эталонного множества ответов (было подготовлено 172 ответа).

В [5] описана система ATM (Automatic Text Marker), написанная на Prolog. Она использует фреймворк Generalised Phrase Structure Grammar (GPSG) для описания синтаксиса и семантики языка. ATM разбивает эталонные ответы преподавателя и ответы тестируемого на некоторые списки минимальных концепций (так называемые “smallest viable unit of concepts”) и подсчитывает общее количество концепций для выставления оценки. Каждой такой концепции приписан некий вес, и в итоговой оценке эти веса суммируются.

В работе [6] сопоставлено максимальное количество концепций в эталонных преподавательских ответах и ответах тестируемого. Для сопоставления использован классификатор TLC (Topical/Local Classifier), в основе которого Байесовский подход, и сопоставление основано на множестве правил и канонических представлений текста. При этом рассматриваются синтаксические и морфологические вариации слов, анафоры и синонимы. Эталонные ответы преподавателя рассматриваются как отдельные высказывания для каждой концепции. Во время оценивания рассматривается только одна концепция, что упрощает оценивание. Методы, применяемые в системе Concept Rater (c-rater), позднее использовались другими исследователями.

Метод сопоставления концепций в дальнейшем совершенствовался, но в современных системах мало используется.

Вторую категорию образуют системы, основанные на методах извлечения информации (Information Extraction Systems). Здесь, как правило, происходит сопоставление неким шаблонам, при этом используются регулярные выражения или деревья разбора. В результате из неструктурированных текстов извлекается информация в виде структурированных данных. Ответ может разбиваться на сегменты, и происходит оценивание каждого сегмента. Для каждого вопроса можно сформулировать более одного шаблона.

Одна из первых работ этой категории – [7]. В ней по ответам преподавателя и студентов строилось дерево разбора, и информация извлекалась поиском по шаблону по такому дереву. Причем использовались два подхода: полностью автоматизированный (blind) и с вмешательством человека (moderated). Преимущество второго метода – возможность пересмотра модели после этого вмешательства.

В [8] описана система WebLAS (Web-based Language Assessment System), написанная на Perl. Она разбивает эталонный ответ на сегменты, выбирает важные и просит преподавателя подтвердить их и назначить каждому свой вес. Также преподаватель может принять или отклонить семантически схожие альтернативы. Затем с помощью регулярных выражений обнаруживается наличие или отсутствие каждого сегмента в ответе студента. Соответственно, возможно оценивание не всего ответа, а его отдельных сегментов.

Метод извлечения информации – один из самых популярных в подобных системах. Предлагаемая в данной работе система также принадлежит к этой категории.

Третью категорию составляют системы, основанные на использовании корпусов (корпусом в лингвистике называется собранный и обработанный по определенным правилам набор текстов, используемый в качестве базы для исследования языка). Обычно корпуса применяются для работы с большими текстами, но подобный метод можно применять и при анализе коротких ответов, как правило, с использованием эталонного ответа в качестве словаря для ограничения правильных ответов. Часто при этом используются N-граммы (N-грамма – это последователь-

ность из *N* элементов, например, для слова «тест» 3-граммами будут «тес» «ест» и т. д.) и некоторые инвертированные индексы структуры данных.

Одна из первых работ этой категории – [9]. В ней для оценивания использована метрика BLEU (BiLingual Evaluation Understudy). Метод основан на совпадении *N*-грамм и на нормализованной длине выборки. Авторы усовершенствовали оригинальный алгоритм BLEU и назвали его ERB (Evaluating Responses with Bleu). На основе этого метода сделана онлайн система Atenea. Позднее к данному методу добавили другой метод, основанный на корпусах, – LSA (Latent Semantic Analysis), и стала использоваться комбинация методов BLEU и LSA с весами.

Авторы системы SAMText (Short Answer Measurementof TEXT) [10] применяют метод, являющийся вариантом LSA, основанный на некотором инвертированном индексе структуры данных. Их алгоритм семантической связанности требует наличия выделенного доменного специфичного индекса или собрания тематически ориентированных документов (т. е. корпуса), который создается с помощью автоматического механизма обхода web-контента, собирающего документы, основанные на описательных ключевых слов домена. Авторы утверждают, что инвертированный индекс и идея обхода документов больше подходят для кратких ответов, чем для больших.

Этот метод, хотя и несколько менее популярный, чем предыдущий, в последнее время в связи с разработкой доступных корпусов становится активно используемым.

В четвертую категорию входят системы, применяющие машинное обучение. При этом обычно используются разные метрики, взятые из методов обработки естественного языка. Они либо комбинируются, либо происходит оценивание с помощью одной из имеющихся классификационных или регрессионных моделей.

Одной их первых в данной категории была система [11], использовавшая для машинного обучения метрики ROUGE из [12] и линейную регрессию. Метрики определяли статистики совпадения *N*-грамм, сравнивали самую длинную общую подпоследовательность (LSC) слов, взвешенную LSC, статистику использования скип-биграмм и т. д. между оцениваемым и эталонным ответами. Архитектура этой системы имела гибкий дизайн, что позволяло ей работать либо автономно, либо как компонент другой системы, например, обучающей платформы.

Следует отметить работу [13]. В отличие от остальных систем проверки ответов, здесь к вопросам, ответам учащихся и эталонным ответам преподавателей добавляется четвертая компонента – читаемые тексты. По мнению авторов, это полезно, т. к. ответ студентов может относиться только к одной части прочитанных текстов. Поэтому нужно анализировать не только пару «ответ учащегося – эталонный ответ», но и пары «ответ учащегося – читаемый текст» и «эталонный ответ – читаемый текст».

Методы машинного обучения в системах анализа текстов набирают популярность в последние годы.

К пятой категории относятся системы, не попадающие под предыдущие категории, или в которых используются комбинированные методы. Многие из этих систем были представлены на коммерческих исследовательских конкурсах Automated Student Assessment Prize [14, 15], Recognizing Textual Entailment Challenge [16] и подобных им.

Проанализировано около сорока систем тестирования из всех категорий и установлено, что подавляющее большинство из них может работать только с английским языком, четыре – с испанским и две – с немецким. Ни одна из систем тестирования не может работать с русским языком. Из-за особенностей русского языка (некоторые из которых будут описаны ниже) модели, применяемые в разработанных системах тестирования, пришлось бы существенно перерабатывать и/или использовать русскоязычные корпусы.

В связи со сказанным выше создание системы тестирования с автоматическим анализом открытых ответов на русском языке является актуальной задачей.

Основа любой подобной системы – лингвистический процессор (ЛП) – приложение, осуществляющее лингвистический анализ системы. Разработка хорошего ЛП для русского языка – чрезвычайно трудоемкая задача. Поэтому нами был выбран уже существующий и хорошо зарекомендовавший себя ЛП для работы с русскими текстами. Он принадлежит к категории извлечения информации, и поэтому создаваемая нами система анализа открытых ответов тоже принадлежит к этой категории.

Требования, накладываемые на систему, функциональная схема и сценарий использования системы преподавателем

При разработке системы автоматической проверки ответов на открытые вопросы учитывалось, что система должна удовлетворять следующим требованиям:

- Уметь анализировать ответы на русском языке.
- Клиентская часть системы должна быть максимально облегчена, чтобы тестирование можно было проходить на обычных компьютерах без специально установленного программного обеспечения (ПО) как в компьютерной аудитории вуза, так и дома (в противном случае тестирование должно проводиться на компьютерах с установленным отдельно клиентским приложением, что могло бы сузить применимость такой системы).
- Обладать возможностью создавать т. н. курсы (как, например, на портале дистанционных образовательных технологий СПбПУ [17]). Курс – это набор учебных материалов (лекций, самостоятельных заданий и т. д.) и оценивающих знания тестов по какой-либо дисциплине. Сами тесты должны находиться внутри курсов. У одного курса может быть несколько тестов.
- Система должна быть многопользовательским приложением. В ней должны существовать группы преподавателей и студентов с разными правами (преподаватели составляют тесты, вопросы и эталонные ответы на них, студенты проходят тестирование). Пользователи объединяются в группы. Причем существует иерархия групп (одни группы могут входить в другие). Один пользователь может состоять в разных группах. Пользователи записываются на курс (как слушатели курса или преподаватели).
- В системе должен существовать банк вопросов, использующихся в тестах, и база эталонных ответов (ответов, данных преподавателями). Причем для более корректной работы системы важна возможность наличия нескольких правильных ответов на один и тот же вопрос, которые может дать как автор вопроса, так и другие преподаватели. Для удобства составления тестов вопросы тоже объединяются в группы. Группы вопросов также имеют иерархическую вложенную структуру. Тесты формируются на основе вопросов из этого банка. Это позволяет использовать один и тот же вопрос в разных тестах. При этом тесты можно создавать по-разному. Например, можно указать, какие вопросы из банка включать в тест, или указать, что в тест войдет какое-то количество случайных вопросов из этой группы вопросов, а какое-то – из другой и т. д. Разумеется, оба способа составления тестов можно комбинировать при составлении одного теста. Система анализирует текст ответа студента и сравнивает его со всеми эталонными ответами, что позволяет более корректно оценить ответ студента.
- Поскольку существует вероятность того, что один и тот же пользователь может проходить один и тот же тест более одного раза, то должна храниться информация о попытках сдачи теста, об оценке, которую поставила система, и если этот ответ оценивал еще и преподаватель, то и об оценке преподавателя за ответ.
- Для более корректной работы системы необходим большой словарь, в котором содержатся как общеупотребительные слова, так и узкоспециализированные термины из предметной области, по которой происходит тестирование.

Также нужен словарь синонимов, которым пользуется система проверки при оценивании ответа. Можно использовать готовые словари или разработать свои.

- Тонкая настройка системы при оценивании каждого ответа. Преподаватель может задать ценность каждого извлечен-

ного из ответа факта (об этом ниже) путем задания весов для каждого факта. Должна существовать возможность сделать это по-разному для каждого эталонного ответа. Используя эти веса, система вычисляет итоговую оценку ответа.

Как уже отмечалось, основной частью подобной системы является ЛП, и нами было решено использовать одну из существующих систем анализа текстов на русском языке, а не разрабатывать собственную.

Как правило, в ЛП анализ текста включает в себя следующие этапы [18]:

1. Графематический анализ (сегментация, токенизация и т. д.).
2. Морфологический анализ (нормализация, стемминг, частеречная разметка и т. д.).
3. Предсинтаксический анализ.
4. Синтаксическая сегментация.
5. Синтаксический анализ.
6. Семантический анализ (хотя до сих пор нет универсальных математических моделей и вообще формальных средств описания смысла слов).

Анализ текста на русском языке осложняется тем, что он считается одним из самых сложных для изучения: в нем, например, свободный порядок слов (иногда без контекста или специальных интонаций в речи даже носителю русского языка трудно правильно истолковать фразу), большое количество правил (и множество исключений из них, и даже исключений из исключений), сложная пунктуация и некоторые другие особенности. В отличие, например, от английского языка, русский язык – синтетический, а не аналитический, т. е. слова в данном языке состоят в основном из нескольких морфем (морфемой называют минимальную единицу языка, которая еще имеет некоторый смысл).

Русский язык считается языком с сильной морфологией: для большинства существительных есть по шесть падежей единственного и множественного числа, три склонения с различающимися окончаниями, три рода; существуют свои особенности образования падежей у одушевленных и неодушевленных существительных, для некоторых падежей существует несколько вариантов форм. В русском языке имеется гигантское, по сравнению с тем же английским языком, количество форм для прилагательных, существует деление глаголов на совершенный и несовершенный виды, и т. д. Ко всему этому существует множество исторически сложившихся исключений.

Русский язык – язык фузионный, а не агглютинативный, в нем морфемы не просто механически приклеиваются (агглютинация – приклеивание) друг к другу, а как бы спаиваются (фузия – сплав) друг с другом. В русском языке абсолютно разные по смыслу слова могут отличаться только ударением, он вообще очень богат формами словоизменения и моделями словообразования по сравнению с тем же английским языком. Все это приводит к тому, что подход к анализу текста в рассмотренных в предыдущем разделе системах для русского языка работать не будет.

В качестве ЛП для системы тестирования было рассмотрено более сорока приложений для работы с русским языком. Большая часть из них – коммерческие или академические системы с закрытым кодом. Из бесплатных и открытых продуктов был выбран Томита-парсер компании Яндекс [19], обладающий, на наш взгляд, наибольшей функциональностью и имеющий подробную документацию. Для Томита-парсера можно создавать свои грамматики и словари, описывать свои факты, что естественно будет необходимым для построения корректной системы автоматической проверки ответов на узкоспециализированные вопросы. В состав Томита-парсера входят три модуля: сегментатор (отвечающий за разбиение текста на предложения), токенизатор (отвечающий за разбиение на слова) и морфологический анализатор mystem.

Исходя из перечисленных требований, предложена и реализована функциональная схема системы тестирования, основные модули которой изображены на рис. 1.

Через браузер с помощью web-интерфейса в БД заносятся вопросы и ответы, происходит непосредственно процесс тестирования, там же выводятся результаты тестирования.

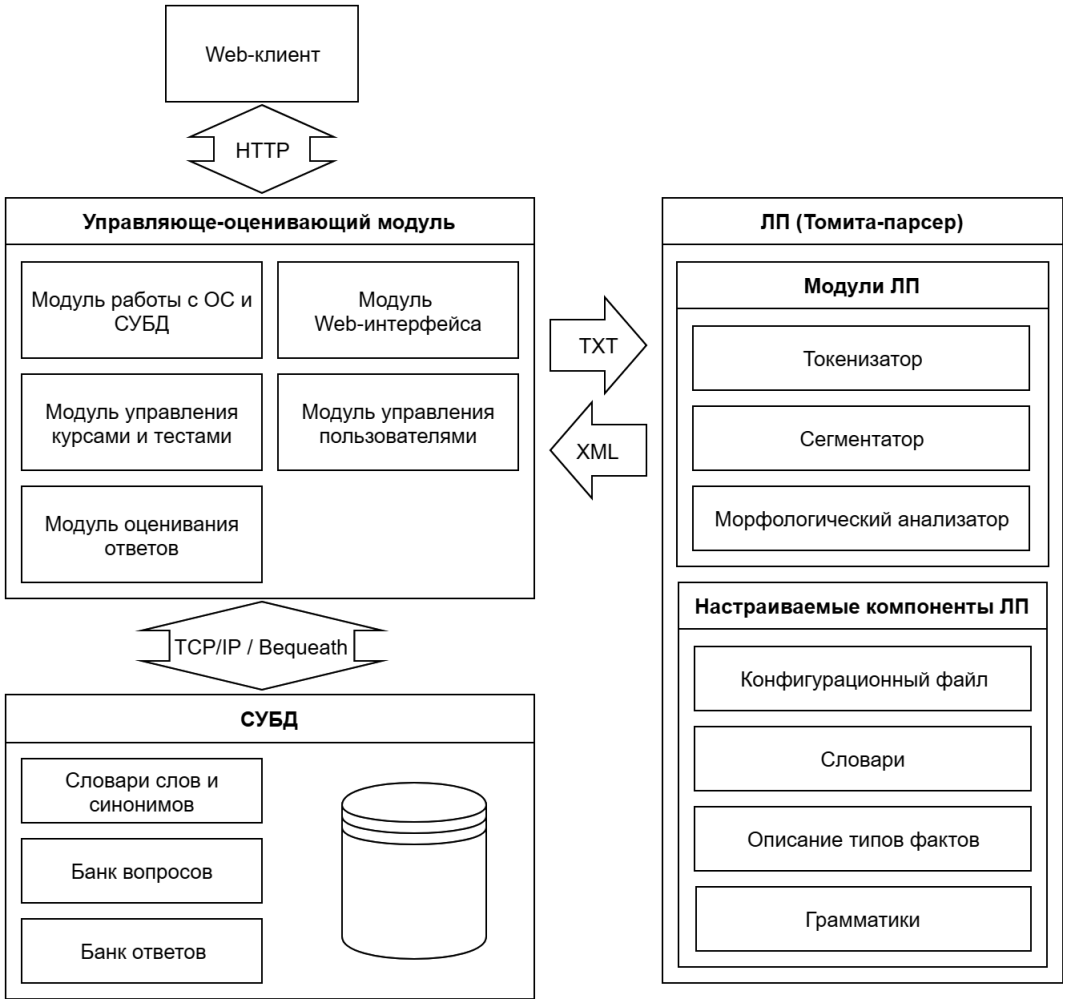

Рис. 1. Функциональная схема системы тестирования

Fig. 1. Functional diagram of the testing system

В БД хранятся вопросы и ответы, а также вспомогательные словари слов и синонимов.

Модуль управления пользователями отвечает за создание пользователей и разделяет их на группы. Модуль управления курсами и тестами создает и редактирует тесты и содержащие их курсы. Задачи модуля работы с ОС и СУБД следующие:

занести в базу данных (БД) вопросы и ответы, а также всю вспомогательную информацию (оценки за ответы, даты сдачи тестов и т. д.);

получить из БД текущий ответ тестируемого и записать его в текстовый файл для анализа Томита-парсером;

найти в БД все эталонные ответы на этот текущий ответ и каждый из них также записать в соответствующий текстовый файл;

запустить Томита-парсер для текущего ответа и всех соответствующих ему эталонных ответов, указав парсеру соответствующие файлы для анализа;

распарсить получившиеся после анализа парсера файлы (формата XML) для передачи фактов модулю оценивания ответов.

Модуль оценивания ответов оценивает ответ тестируемого по алгоритму, описанному в следующем разделе.

БД состоит из 18 таблиц, основные из которых:

- course – таблица, содержащая инфор-

мацию о курсах;

• course_groups – таблица, содержащая информацию о группах пользователей (студентов и преподавателей), записанных на курс;

• course_tests – таблица, содержащая тесты курса;

• question – таблица, содержащая банк вопросов;

• question_answer – таблица, содержащая эталонные ответы на вопросы;

• question_group – таблица, содержащая группы вопросов;

• test – таблица, содержащая тесты;

• test_try – таблица, содержащая попытки сдачи теста;

• user – таблица, содержащая информацию о пользователях;

• words – таблица, содержащая словарь слов;

• word_synonyms – таблица, соединяющая слова с их синонимами (словарь синонимов).

Для правильной работы Томита-парсера нужно создать следующие файлы:

конфигурационный файл;

файл(ы) с описанием типов фактов, которые извлекает парсер;

газеттир(ы) (словарь ключевых слов для парсера, использующихся при анализе грамматиками);

файл(ы) с набором грамматик.

Про факты и грамматики будет сказано в следующем разделе.

Приведем краткий сценарий использования системы преподавателем.

После входа в систему у преподавателя имеется возможность выбора одного из существующих курсов или создания нового. При выборе существующего курса можно зайти в банк вопросов этого курса, составить новый тест или посмотреть ответы на уже существующие тесты для этого курса. Если зайти в банк вопросов, то можно составить новый вопрос (указав иерархическую группу этого вопроса и минимум один эталонный ответ) или написать еще один эталонный ответ на существующий вопрос, или задать веса для фактов существующего эталонного ответа. При составлении теста указывается количество вопросов в тесте, откуда они берутся (случайно или указать конкретные), критерии оценивания (процент правильных ответов для соответствующей оценки за тест). При выборе уже существующего теста появляется возможность его изменить или самостоятельно оценить ответы студентов на вопросы этого теста. Также имеется возможность запустить оценивание теста заново, например, если добавлены новые эталонные ответы к вопросам или новые веса.

Алгоритм анализа ответов в системе

Анализ ответов в системе происходит по следующему алгоритму.

Из базы данных берется очередной ответ тестируемого на какой-нибудь вопрос, он переводится в текстовый файл и подается на вход Томита-парсера. Томита-парсер анализирует его и записывает результаты (список фактов) в XML-файл. Этот XML-файл затем парсится, и получается список фактов в удобном для программы виде (рис. 2).

Томита-парсер позволяет выделять из текста на русском языке сущности, которые называются *фактами*. Выделение происходит с помощью написанных пользователем шаблонов (или грамматических правил), наборы таких правил называют *грамматиками*. Факты можно представить как некие таблицы с колонками, которые называются *полями фактов* (например, факт «собрание» может иметь поля «место», «время» и «тема»).

Вот пример простейшего грамматического правила:

S ->AdjWord<h-reg1>+.

По этому правилу будет выделяться прилагательное или причастие, или порядковое числительное (Adj), после которого следует один или несколько (оператор +) слов из букв русского или латинского алфавита (Word), у каждого из которых первая буква должна стоять в верхнем регистре (<h-reg1>).

Нами было написано 41 грамматическое правило (которые Томита-парсер затем перевела в 138 правил) для извлечения 11 фактов (шести фактов, описывающих

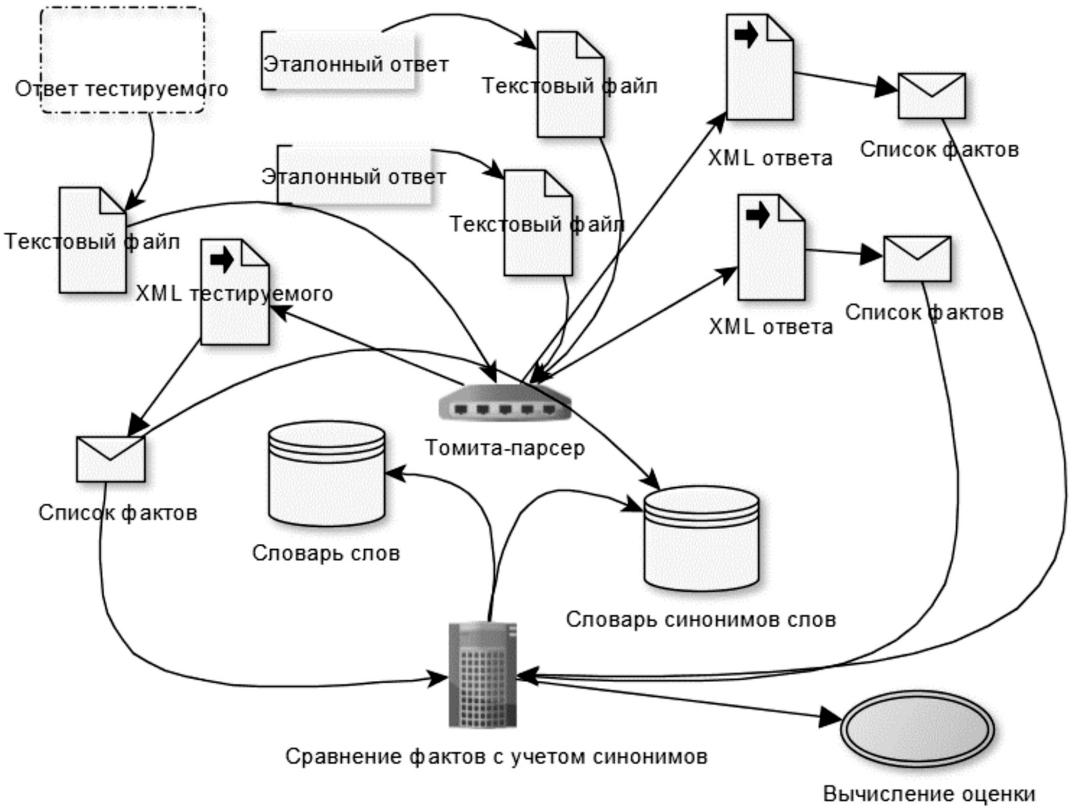

Рис. 2. Схема проверки ответа

Fig. 2. Response verification scheme

части речи (имя существительное, глагол, имя прилагательное, причастие, частица, предлоги и союзы), трех фактов, описывающих члены предложения (подлежащее, сказуемое, дополнение), и двух фактов, описывающих специфичные для предметной области тестирования термины и названия). К сожалению, невозможно заранее придумать полный набор грамматических правил, пригодный для анализа произвольно сколь угодно сложного предложения: чем лингвистически сложнее анализируемое предложение, тем сложнее должны быть соответствующие правила.

По нашим грамматикам системой был получен список списков фактов ответа (*список списков*, т. к. может существовать несколько экземпляров одного и того же факта).

Например, если в предложении четыре существительных и два глагола, то у нас будет список «Существительное» из четырех фактов и список «Глагол» из двух фактов.

Далее, для того же самого вопроса в базе данных находятся все эталонные ответы. Для них проводится такая же процедура по получению списка списков фактов.

Пусть A, B, C, ..., K – извлекаемые нами факты (например, если A – это «Существительное», а B – «Глагол», то для рассмотренного выше предложения из четырех существительных и одного глагола получатся списки $\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ и $\{B_1, B_2\}$).

В результате работы парсера в общем случае у нас есть список списков фактов (обозначим этот список ξ) проверяемого ответа $\{\{A_1, A_2, ..., A_{p1}\}, \{B_1, B_2, ..., B_{q1}\}, \{C_1, C_2, ..., C_{r1}\}, ...\{K_1, K_2, ..., K_{z1}\}\}$ (какие-то из списков фактов могут быть пустыми) и набор списков фактов соответствующих эталонных ответов:

$\{\{A'_1, A'_2, ..., A'_{p2}\}, \{B'_1, B'_2, ..., B'_{q2}\}, \{C'_1, C'_2, ..., C'_{r2}\}, ...\{K'_1, K'_2, ..., K'_{z2}\}\}$ (обозначим этот список α),

{{A''$_1$, A''$_2$, ..., A''$_{p3}$}, {B''$_1$, B''$_2$, ..., B''$_{q3}$}, {C''$_1$, C''$_2$, ..., C''$_{r3}$}, ...{K''$_1$, K''$_2$, ..., K''$_{z3}$}} (обозначим этот список β) и т. д.

Далее запускается алгоритм сравнения: список ξ поочередно сравнивается с каждым списком из набора списков фактов соответствующих эталонных ответов (с α, с β и т. д.).

Сравнение происходит так: в списке ξ для каждого из N фактов нужно найти долю правильности f. Доля правильности считается следующим образом: берется список, соответствующий данному факту (например, {A_1, A_2, ..., A_{p1}}), и для каждого члена этого списка вначале ищется совпадение с членами списка этого же факта в списке α (то есть {A'$_1$, A'$_2$, ..., A'$_{p2}$}). Если совпадения не нашлось, то в словаре синонимов находятся все синонимы для этого члена, и потом определяется, нет ли среди этих синонимов членов списка этого же факта в списке α ({A'$_1$, A'$_2$, ..., A'$_{p2}$}). Каждому члену списков фактов A_i можно сопоставить пару чисел (m, s) (от match и synonym), где $m = 1$, если A_i совпадает с одним из {A'$_1$, A'$_2$, ..., A'$_{p2}$}; $m = 0$, если A_i не совпадает ни с одним из {A'$_1$, A'$_2$, ..., A'$_{p2}$}; $s = 1$, если есть синоним для A_i, совпадающий с одним из {A'$_1$, A'$_2$, ..., A'$_{p2}$}; $s = 0$ – нет синонима для A_i, совпадающего с одним из {A'$_1$, A'$_2$, ..., A'$_{p2}$} (возможные значения пар (m, s) – (1,0), (0,1) и (0,0)).

Суммируем все явные совпадения (Σm) и совпадения с учетом синонимов (Σs) – это будет числитель для f. В знаменателе будет стоять количество членов списка этого же факта в списке α (обозначим это количество через σ – для списка {A'$_1$, A'$_2$, ..., A'$_{p2}$} будет $\sigma = p2$). Таким образом, f будет равно единице, если для каждого члена списка данного факта списка α эталонного ответа найдется либо точное совпадение в списке данного факта списка ξ, либо синоним. В общем случае, f всегда принимает значения в интервале [0;1] (естественно, мы обрабатываем случаи, когда данного факта вообще нет в эталонном ответе: когда числитель равен нулю, или когда тестируемый ввел несколько синонимов для одного факта в своем ответе, и знаменатель стал больше числителя).

Запишем математически формулу для доли правдивости данного i-го факта:

$$f_i = \frac{\sum_k m_k + \sum_k s_k}{\sigma}. \quad (1)$$

Приведем простейший пример. Пусть есть вопрос «Как изменится на фотографии вид полной Луны, если закрыть правую половину объектива телескопа?» и один из эталонных ответов «Изображение не изменится, фотография станет менее яркой». Система оценивала ответ студента «Вид не поменяется, фото будет тусклее».

Парсер извлек список фактов (это список ξ) для проверяемого ответа {«Существительное» {«вид», «фото»}, «Глагол» {«поменяться», «будет»}, «Прилагательное» {«тусклый»} и т. д.} и список фактов (это список α) для эталонного ответа {«Существительное» {«изображение», «фотография»}, «Глагол» {«измениться», «стать»}, «Прилагательное» {«яркая»} и т. д.}.

Проверяем список факта «Существительное» – для слова «вид» совпадения в списке α нет, но в словаре синонимов есть информация, что «вид» и «изображение» – это синонимы, поэтому для этого слова будем иметь $m = 0$ и $s = 1$. Аналогично, для слова «фото» нет точного совпадения, но есть синоним «фотография», поэтому также $m = 0$ и $s = 1$. Таким образом, доля правдивости факта «Существительное» в списке ξ для списка α будет равна $f = (1+1)/2 = 1$. Далее проверяем список для факта «Прилагательное» (в данном случае список состоит из одного элемента и в ξ, и в α) – для слова «тусклый» $m = 0$ и $s = 1$ и доля правдивости факта «Прилагательное» в списке ξ для списка α будет равна $f = 1/1 = 1$. Такая проверка происходит для всех фактов в списке ξ.

При задании эталонного ответа каждому i-му факту можно приписать свой вес w_i (для каждого ответа веса задаются независимо). Далее считается оценка – суммируются все веса (Σw_i) для всех фактов для данного эталонного ответа (это будет нормировочный знаменатель) и суммируется произведение веса факта на его долю прав-

дивости (это числитель), формулой оценки ответа $mark_j$ при сравнении с данным j-м эталонным ответом будет:

$$mark_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i f_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i}. \quad (2)$$

Оценка ответа также лежит в интервале [0;1]. А далее нужно проделать точно такую же процедуру для следующего эталонного ответа (для списка β) и т. д. Итоговая оценка будет максимальной из всех оценок для всех эталонных ответов (ее можно умножить на 100 % для наглядности) – это следующая формула:

$$mark = \max\{mark_j\}. \quad (3)$$

Для иллюстрации формул (2), (3) предположим, что преподаватель дал еще один эталонный ответ «Луна останется полной», и что он для обоих эталонных ответов приписал веса, равные единице, для фактов «Существительное» и «Прилагательное», и равные нулю для всех остальных фактов. По формуле (2) ответ студента по сравнению с первым эталонным ответом дает оценку $mark_1 = (1 \cdot 1 + 1 \cdot 1) / (1 + 1) = 1$, а со вторым эталонным ответом (поскольку доли правдивости фактов «Существительное» и «Прилагательное» теперь равны нулю) дает оценку $mark_2 = (1 \cdot 0 + 1 \cdot 0) / (1 + 1) = 0$. В результате по формуле (3) ответ студента будет оценен на 100 %.

Реализация и тестирование системы

При реализации системы в качестве СУБД была выбрана СУБД Oracle Database 12c (но тестировалась система и на версии 11g). Все модули, кроме web-интерфейса, были написаны на языке PL/SQL, а для последнего была использована Java (с HTML/CSS). Для тестирования взяли ответы студентов на вопросы по дисциплинам «Администрирование СУБД Oracle» и «Физика». Использование вопросов из столь разных проблемных областей позволило более широко проанализировать поведение системы.

Для системы применялся словарь общеупотребительных слов, который мы пополнили узкоспециализированными терминами по физике и администрированию СУБД Oracle. В основу этого словаря положены готовые бесплатные словари, найденные в Интернете (например, [20]). На момент тестирования словарь состоял примерно из 200 000 слов. Практически каждое слово из этого словаря было и в словаре синонимов размером около 440 000 строк.

Для тестирования системы было собрано и проверено (независимо системой и преподавателем) 1445 ответов студентов 1, 2 и 4 курсов. Отметим лингвистическое разнообразие ответов: на некоторые вопросы тестируемые давали ответ, состоящий из одного слова, на другие – из более 50 слов. Примеры вопросов и ответов приведены в табл. 1. Результаты тестирования даны в табл. 2. Указан процент ответов, которые система и преподаватель оценивали как правильные или неправильные.

Видно, что результаты системы очень хорошие: корректное определение – 88,10 %, некорректное определение – 11,90 %.

Также количественной мерой результатов согласия оценивания системы и преподавателя может служить коэффициент согласия каппа Коэна, который очень часто используется в работах по системам автоматической проверки [21]. Для вычисления коэффициента согласия каппа на основе полученных результатов может быть составлена таблица сопряженности (табл. 3).

Тогда коэффициент каппа будет считаться по формуле:

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}, \quad (4)$$

где p_o – наблюдаемая (чистая) согласованность; p_e – случайная согласованность, которые для нашей таблицы сопряженности вычисляются по формулам:

$$p_o = \frac{747 + 526}{747 + 146 + 26 + 526};$$

$$p_e = \frac{(747 + 26) \cdot (747 + 146) +}{(747 + 146 + 26 + 526) \times}$$
$$\frac{+ (526 + 26) \cdot (526 + 146)}{\times (747 + 146 + 26 + 526)}.$$

Результаты вычислений дают для

Таблица 1

Примеры вопросов и ответов

Table 1

Examples of questions and answers

Категории ответов	Вопрос	Эталонный ответ	Ответ студента
Ответы, которые преподаватель оценил как правильные, и система тоже оценила как правильные	Кому доступны данные, добавленные во временную таблицу в течение сессии?	Пользователю сессии	Пользователю, создавшему эту сессию
	Как изменится на фотографии вид полной Луны, если закрыть правую половину объектива телескопа?	*а*) Изображение не изменится, станет менее ярким. *б*) Луна останется полной	Вид не поменяется, фото будет тусклее
	Что изучает классическая механика?	*а*) Медленные движения макроскопических тел. *б*) Движения макроскопических тел при скорости, много меньшей скорости света	Движение макроскопических тел со скоростями малыми, по сравнению со скоростью света
Ответы, которые преподаватель оценил как неправильные, а система оценила как правильные	При дифракции Френеля на круглом отверстии дифракционная картина будет иметь вид чередующихся светлых и темных концентрических колец, в центре которой будет светлое пятно, если отверстие открывает...	Четное число зон Френеля	Нечетное число зон Френеля
Ответы, которые преподаватель оценил как правильные, а система оценила как неправильные	Поясните смысл нижеприведенного состояния ограничения: enable novalidate	Будет проводиться проверка новых данных, а введенные ранее данные останутся без проверки	Ограничение активируется без проверки старых данных
	Что изучает классическая механика?	*а*) Медленные движения макроскопических тел. *б*) Движения макроскопических тел при скорости, много меньшей скорости света	Изучает законы движения макроскопических тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света в вакууме

Ответы, которые преподаватель оценил как неправильные, и система тоже оценила как неправильные	Что такое кластер? Для чего он используется?	Кластер – это способ хранения в одном сегменте группы таблиц, имеющих один или более общих столбцов. Используется для ускорения доступа к совместно используемым данным из нескольких таблиц	Вид таблиц, хранящихся в одном сегменте
	Что получится, если от кинетической энергии системы материальных точек отнять кинетическую энергию той же системы в ее относительном движении по отношению к поступательно движущейся системе координат с началом в центре масс?	Кинетическая энергия всей массы системы, сосредоточенной в ее центре масс	Кинетическая энергия движущейся системы

Таблица 2

Результаты тестирования

Table 2

Test results

Категории оценки ответов	Общее количество (%)
Ответы, которые преподаватель оценил как правильные, и система тоже оценила как правильные	747 (51,70)
Ответы, которые преподаватель оценил как неправильные, а система оценила как правильные	26 (1,80)
Ответы, которые преподаватель оценил как правильные, а система оценила как неправильные	146 (10,10)
Ответы, которые преподаватель оценил как неправильные, и система тоже оценила как неправильные	526 (36,40)

Таблица 3

Таблица сопряженности

Table 3

Contingency Table

		Система	
		Ответ верен	Ответ неверен
Преподаватель	Ответ верен	747	146
	Ответ неверен	26	526

коэффициента каппа значение 0,76, что считается достаточно высоким результатом. Например, у описанных выше систем c-rater [6] и SAMText [10] средние значения коэффициентов каппа равны соответственно 0,74 и 0,73, а у лучших работ ASAP SAS [14] в 2012 г. коэффициент каппа был от 0,73 до 0,75.

Скорость оценивания системы намного превосходит скорость оценивания преподавателем: на оценивание одного теста с 30 ответами уходит времени порядка 40 с. При этом, в отличие от преподавателя, система может без устали проверить сколько угодно тестов.

Анализ результатов тестирования показал, что система отлично справляется с короткими ответами (в смысле совпадения результатов оценки системы и преподавателя, если и исходный эталонный ответ не велик), но испытывает некоторые сложности при оценивании больших (порядка 40–50 слов) предложений.

Существует несколько возможностей по совершенствованию системы:

1. Экстенсивные – добавление новых грамматик извлечения фактов и добавление новых слов в словари слов и синонимов.

2. Добавление в словари слов и синонимов грамматически ошибочных версий слов (например, «програма», «праграмма» наряду с «программа»). Это позволит обрабатывать логически правильные ответы, в которых сделаны описки и грамматические ошибки.

3. Наряду с системой весов разных фактов, можно ввести систему проверки ключевых слов. Например, автор вопроса может добавить к ответу список ключевых слов. Тогда система начнет анализ ответа с этого списка – если ни одного из ключевых слов (или их синонимов) в ответе не найдено, то ответ сразу можно считать неправильным.

Заключение

В статье предложена функциональная схема системы автоматического оценивания ответов на открытые вопросы на русском языке. Для лингвистического процессора системы, относящегося к категории извлечения информации, предложен алгоритм анализа ответов. Введена возможность настройки системы при оценивании каждого ответа путем задания весов для каждой сущности и для каждого из имеющихся эталонных ответов.

Система была реализована и протестирована. По оцениванию результатов тестов по дисциплинам «Администрирование СУБД Oracle» и «Физика» можно заключить, что полученная система удовлетворяет предъявленным к ней требованиям и выполняет проверку ответов по крайней мере в данных предметных областях, с высокой степенью согласия с оцениванием преподавателем. Получившаяся система достаточно универсальна и может использоваться для тестирования по любым предметам.

В настоящее время продолжается работа по дальнейшему усовершенствованию системы.

Кроме реализации описанных выше возможностей по совершенствованию, для поиска синонимов предлагается использовать систему Word2vec, обученную на русской Wikipedia и Национальном корпусе русского языка. Word2vec – программа для анализа семантики естественных языков, и использование больших корпусов русского языка представляется перспективным для дополнительного поиска семантических синонимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Burrows S., Gurevych I., Stein B.** The eras and trends of automatic short answer grading // Internat. Journal of Artificial Intelligence in Education. 2015. Vol. 25. Pp. 60–117.

2. **Mòdritscher F., Sindler A.** Quizzes are not enough to reach high-level learning objectives! // Proc. of the World Conf. on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications 2005. Montreal, Canada, 2005. Pp. 3275–3278.

3. **Burstein J., Kaplan R., Wolff S., Lu C.** Using lexical semantic techniques to classify free-responses // Proc. of the ACL SIGLEX Workshop on Breadth and Depth of Semantic Lexicons. 1996. Pp. 20–29.

4. **Dorr B., Hendler J., Blanksteen S., Migdaloff B.** On beyond syntax: use of lexical conceptual structure for intelligent tutoring // Intelligent Language Tutors. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Publishers, 1995. Pp 289–311.

5. **Callear D., Jerrams-Smith J., Soh V.** CAA of Short Non-MCQ Answers // Proc. of the 5th Computer Assisted Assessment Conf. Loughborough, United Kingdom, 2001. Pp 1–14.

6. **Leacock C., Chodorow M.** C-rater: automated scoring of short-answer questions // Computers and the Humanities. 2003. No. 37(4). Pp. 389–405.

7. **Mitchell T., Russell T., Broomhead P., Aldridge N.** Towards robust computerised marking of free-text responses // Proc. of the 6th Computer Assisted Assessment Conf. 2002. Pp. 233–249.

8. **Bachman L.F., Carr N., Kamei G., Kim M., Pan M.J., Salvador C., Sawaki Y.** A reliable approach to automatic assessment of short answer free responses // Proc. of the 19th Internat. Conf. on Computational Linguistics. Taipei, 2002. Pp. 1–4.

9. **Alfonseca E., Perez D.** Automatic assessment of open ended questions with a BLEU-Inspired algorithm and shallow NLP // Lecture Notes in Computer Science. Advances in Natural Language Processing. 2004. Vol. 3230. Pp. 25–35.

10. **Bukai O., Pokorny R., Haynes J.** An automated short-free-text scoring system: development and assessment // Proc. of the 20th Interservice. Industry Training, Simulation, and Education Conf. National Training and Simulation Association. 2006. Pp 1–11.

11. **Gütl C.** e-Examiner: Towards a fully-automatic knowledge assessment tool applicable in adaptive E-Learning systems // Proc. of the 2nd Internat. Conf. on Interactive Mobile and Computer Aided Learning. Amman, Jordan, 2007. Pp. 1–10.

12. **Lin C.-Y.** ROUGE: A Package for automatic evaluation of summaries // Proc. of the 1st Text Summarization Branches out Workshop at ACL. Barcelona, Spain, 2004. Pp. 74–81.

13. **Horbach A., Palmer A., Pinkal M.** Using the text to evaluate short answers for reading comprehension exercises // Proc. of the 2nd Joint Conf. on Lexical and Computational Semantics. Atlanta, USA: Association for Computational Linguistics, 2013. Vol. 1. Pp. 286–295.

14. Automated Student Assessment Prize. The Hewlett Foundation: Short Answer Scoring // URL: https://www.kaggle.com/c/asap-sas

15. Automated Student Assessment Prize. The Hewlett Foundation: Automated Essay Scoring // URL: https://www.kaggle.com/c/asap-aes

16. Past TAC Data // URL: https://tac.nist.gov//data/

17. Портал дистанционных образовательных технологий СПбПУ // URL: https://dl.spbstu.ru/

18. **Большакова Е.И., Клышинский Э.С., Ландэ Д.В., Носков А.А., Пескова О.В., Ягунова Е.В.** Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика. М.: МИЭМ, 2011.

19. Томита-парсер. Документация. Руководство разработчика // URL: https://tech.yandex.ru/tomita/doc/dg/concept/about-docpage/

20. MySQL БД синонимов русского языка // URL: https://www.mindcollapse.com/blog/177.html

21. Cohen'skappa // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cohen's_kappa.

Статья поступила в редакцию 31.03.2017.

REFERENCES

1. **Burrows S., Gurevych I., Stein B.** The eras and trends of automatic short answer grading. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 2015, Vol. 25, Pp. 60–117.

2. **Mödritscher F., Sindler A.** Quizzes are not enough to reach high-level learning objectives! *Proceedings of the World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications 2005,* Montreal, Canada, 2005, Pp. 3275–3278.

3. **Burstein J., Kaplan R., Wolff S., Lu C.** Using lexical semantic techniques to classify free-responses. *Proceedings of the ACL SIGLEX Workshop on Breadth and Depth of Semantic Lexicons*, 1996, Pp. 20–29.

4. **Dorr B., Hendler J., Blanksteen S., Migdaloff B.** On beyond syntax: use of lexical conceptual structure for intelligent tutoring. *Intelligent Language Tutors.* Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Publishers, 1995, Pp 289–311.

5. **Callear D., Jerrams-Smith J., Soh V.** CAA of Short Non-MCQ Answers. *Proceedings of the 5th Computer Assisted Assessment Conference,* Loughborough, United Kingdom, 2001, Pp 1–14.

6. **Leacock C., Chodorow M.** C-rater: automated scoring of short-answer questions. *Computers and the Humanities*, 2003, No. 37(4), Pp. 389–405.

7. **Mitchell T., Russell T., Broomhead P., Aldridge N.** Towards robust computerised marking of free-text responses. *Proceedings of the 6th Computer Assisted Assessment Conference*, 2002, Pp. 233–249.

8. **Bachman L.F., Carr N., Kamei G., Kim M., Pan M.J., Salvador C., Sawaki Y.** A reliable approach to automatic assessment of short answer free responses. *Proceedings of the 19th International Conference on Computational Linguistics.* Taipei, 2002, Pp. 1–4.

9. **Alfonseca E., Perez D.** Automatic assessment of open ended questions with a BLEU-Inspired

algorithm and shallow NLP. *Lecture Notes in Computer Science. Advances in Natural Language Processing*, 2004, Vol. 3230, Pp. 25–35.

10. **Bukai O., Pokorny R., Haynes J.** An automated short-free-text scoring system: development and assessment. *Proceedings of the 20th Interservice. Industry Training, Simulation, and Education Conference. National Training and Simulation Association*, 2006, Pp 1–11.

11. **Gütl C.** e-Examiner: Towards a fully-automatic knowledge assessment tool applicable in adaptive E-Learning systems. *Proceedings of the Second International Conference on Interactive Mobile and Computer Aided Learning.* Amman, Jordan, 2007, Pp. 1–10.

12. **Lin C.-Y.** ROUGE: A package for automatic evaluation of summaries. *Proceedings of the 1st Text Summarization Branches out Workshop at ACL.* Barcelona, Spain, 2004, Pp. 74–81.

13. **Horbach A., Palmer A., Pinkal M.** Using the text to evaluate short answers for reading comprehension exercises. *Proceedings of the 2nd Joint Conference on Lexical and Computational Semantics.* Atlanta, USA: Association for Computational Linguistics, 2013, Vol. 1, Pp. 286–295.

14. Automated Student Assessment Prize. The Hewlett Foundation: Short Answer Scoring. Available: *https://www.kaggle.com/c/asap-sas*

15. Automated Student Assessment Prize. The Hewlett Foundation: Automated Essay Scoring. Available: *https://www.kaggle.com/c/asap-aes*

16. Past TAC Data. Available: *https://tac.nist.gov//data/*

17. Portal of distance learning technologies SPbPU. Available: *https://dl.spbstu.ru/*

18. **Bolshakova Ye.I., Klyshinskiy E.S., Lande D.V., Noskov A.A., Peskova O.V., Yagunova Ye.V.** *Avtomaticheskaya obrabotka tekstov na yestestvennom yazyke i kompyuternaya lingvistika* [*Automatic Natural Language Processing and Computational Linguistics*]. Moscow: MIEM Publ., 2011. (rus)

19. Tomita parser Documentation. Developer's Guide. Available: *https://tech.yandex.ru/tomita/doc/dg/concept/about-docpage/*

20. MySQL database of Russian synonyms. Available: *https://www.mindcollapse.com/blog/177.html*

21. Cohen's kappa. Available: *https://en.wikipedia.org/wiki/Cohen's_kappa.*

Received 31.03.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

КОЖЕВНИКОВ Вадим Андреевич
KOZHEVNIKOV Vadim A.
E-mail: vadim.kozhevnikov@gmail.com

САБИНИН Олег Юрьевич
SABININ Oleg Yu.
E-mail: olegsabinin@mail.ru

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

CIRCUITS AND SYSTEMS SOCIETY

ISSCS 2019

14-th International Symposium on Signals, Circuits, and Systems
Iasi, Romania, July 11–12, 2019
organized by:
Faculty of Electronics, Telecommunications and Information Technology, "Gh. Asachi" Technical University of Iasi
IEEE Romania Section & CAS Chapter in cooperation with IEEE CAS Society

Call for Papers

Honorary Chair
Daniela Tărniceriu
Technical University of Iasi, Romania

General Co-Chairs
Liviu Goras
Technical University of Iasi, Romania

Sanjit Mitra
University of California, Santa Barbara, CA, USA

Technical Program Committee
Majid Ahmadi, Canada - **Chair**
David Allstot, USA
Marco Carli, Italy
Mrityunjoy Chakraborti, India
Jonathon Chambers, U.K.
Pak-Chung Ching, Hong Kong
Farhat Fnaiech, Tunisia
Daniel Foty, USA
Gabriel Gomes, Brazil
Jiwu Huang, China
Gordana Jovanovic-Dolecek, Mexico
Alexander S. Korotkov, Russia
Anamitra Makur, Singapore
Rui Martins, Macao
Yoshikazu Miyanaga, Japan
Soo-Chang Pei, Taiwan
Branimir Reljin, Serbia
Markus Rupp, Austria
Corneliu Rusu, Romania
Mohamad Sawan, Canada
Erchin Serpendin, USA
Mani Soma, USA
Wonyong Sung, Korea
Ioan Tabus, Finland
Siddik Yarman, Turkey

ISSCS 2019 aims at bringing together scientists and researchers from academia and industry to present and discuss some of their latest ideas and results.

Prospective authors are invited to submit original papers in the following areas:

- **Linear and Nonlinear Circuits & Systems**
- **Circuits & Systems for Communications**
- **Power Electronic Circuits**
- **Analog and Digital Signal Processing**
- **Image and Video Processing**
- **VLSI Circuits & Systems**

The official language of the symposium will be English.

AUTHOR'S SCHEDULE:

Proposals for special sessions	December 17, 2018
Submission of full paper	February 18, 2019
Notification of acceptance	April 15, 2019
Submission of camera-ready version and registration form with signed copyright form	May 1, 2019

The papers should be written in IEEE/CAS A4 format (double column including paper title, authors' names and affiliation, short abstract). They should not exceed 4 pages (including figures and references).

Authors are expected to present their papers at the Symposium. At least one author of each accepted paper must register in order to have the paper included in the program and Proceedings.

ISSCS 2019
http://scs.etti.tuiasi.ro/isscs2019

Faculty of Electronics & Telecommunications
Bd. Carol I no.11A
700506, Iasi, ROMANIA
Conference email address:
isscs2019@etti.tuiasi.ro

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 11, № 3, 2018

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, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Перевод на английский язык *А.С. Колгатина*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 28.09.2018. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 8,83. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 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 для печати 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 10^{00} до 18^{00} Галина Александровна
или по e-mail: infocom@spbstu.ru