



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

6(234) 2015

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:

Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

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;

Карнов Ю.Г., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

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

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.

Dr. *Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

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;

Устинов С.М., 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 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» ISSN 1994-2354.

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

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

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.

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

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

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.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2015

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



**ST. PETERSBURG STATE
POLYTECHNICAL UNIVERSITY
JOURNAL**

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

6(234) 2015

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2015

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:

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

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. *Yuri G. Karpov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

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

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

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

Dr. *Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

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. *Viacheslav P. Shkodyrev*, 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.

The journal is published under scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995. The journal is published since 2008 as part of the periodical edition «Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU» (ISSN 1994-2354).

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 publications are presented in the VINITI RAS Abstract Journal and Ulrich's Periodical Directory International Database.

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.

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

The journal is on the Russian Science Citation Index (RSCI) database

© Scientific Electronic Library (<http://elibrary.ru/>).

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.

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2015

Содержание

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

Перелыгин С.В., Кривошейкин А.В. Чувствительность микрофонной антенной решетки к воздействию собственных шумов микрофонов.....	7
Богданов А.В., Малыгин И.Г. Технология обеспечения информационной безопасности крупных музейных и выставочных комплексов	14
Перелыгин С.В., Нурмухамедов Л.Х. Повышение качества обработки речевых сигналов с помощью микрофонной антенной решетки	25

Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

Ботнев В.А., Устинов С.М. Методика определения расстояния между точкой и линией в геодезии.....	33
--	----

Интеллектуальные системы и технологии

Шубников В.Г., Беляев С.Ю. Реконструкция пространственной формы стопы человека на основе цифровых изображений	45
Бендерская Е.Н., Перешеин А.О. Хаотические модели гиппокампа в задачах распознавания динамических образов.....	56
Павлов В.А., Пак В.Г. Экспериментальная программа для доказательства теорем интуиционистской логики обратным методом Маслова.....	70

Инфокоммуникационные технологии в образовании

Колосков С.С., Бабешко В.Н., Самочадин А.В. Ключевые показатели эффективности при управлении образовательными организациями с использованием технологии MDM и BYOD.....	81
Тимофеев Д.А., Самочадин А.В. Средства автоматизации текущего контроля успеваемости на основе системы управления мобильными устройствами.....	95

Contents

Information Technologies

Circuits and Systems for Receiving, Transmitting and Signal Processing

Perelygin S.V., Krivosheykin A.V. <i>Microphone Array Sensitivity to the Effect of Inherent Noise of Microphones</i>	7
Bogdanov A.V., Malygin I.G. <i>Technology Information Security of Large Museum and Exhibition Complexes</i>	14
Perelygin S.V., Nurmukhamedov L.H. <i>Improving the Quality of Speech Signal Processing Via a Microphone Array</i>	25

Simulations of Computer, Telecommunications, Control and Social Systems

Botnev V.A., Ustinov S.M. <i>A Method for Finding the Distance between a Point and a Line in Geodesy Intellectual Systems and Technologies</i>	33
---	----

Intellectual Systems and Technologies

Shubnikov V.G., Belyaev S.Yu. <i>3D Reconstruction of the Spatial Form of the Human Foot Based on Three Digital Images</i>	45
Benderskaya E.N., Pereshein A.O. <i>Chaotic Models of the Hippocampus for Dynamic Pattern Recognition</i>	56
Pavlov V.A., Pak V.G. <i>An Experimental Computer Program for Automated Reasoning in Intuitionistic Logic Using the Inverse Method</i>	70

Information and Telecommunications Technologies in Education

Koloskov S.S., Babeshko V.N., Samochadin A.V. <i>Primary Indicators of Efficiency in the Management of Educational Institutions Using the MDM and the BYOD Technologies</i>	81
Timofeev D.A., Samochadin A.V. <i>A Mobile Service for Assessment Based on a Mobile Device Management System</i>	95

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МИКРОФОННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ МИКРОФОНОВ

S.V. Perelygin, A.V. Krivosheykin

MICROPHONE ARRAY SENSITIVITY TO THE EFFECT OF INHERENT NOISE OF MICROPHONES

Исследовано влияние собственных шумов микрофонной антенной решетки на эффективность пространственной обработки широкополосных речевых сигналов: на точность определения направлений прихода акустических сигналов от двух источников при их одновременном воздействии; на степень подавления мешающего сигнала; на субъективную оценку заметности мешающего сигнала, подавленного не полностью.

МИКРОФОННАЯ РЕШЕТКА; ПОЛЕЗНЫЙ И МЕШАЮЩИЙ РЕЧЕВОЙ СИГНАЛ; ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ; ПОДАВЛЕНИЕ СИГНАЛА.

In this article we explore the influence of a microphone array's inherent noise on the efficiency of the spatial processing of wideband speech signals; on the accuracy of determining the directions from which acoustic signals arrive (if a microphone array receives two broadband acoustic signals at the same time); on the degree of interfering signal suppression; on the subjective assessment of the interfering signal which is not completely suppressed. The inherent noise of the array introduces an error in determining the signal source direction. The authors have obtained mathematical dependences which allow to find the ultimate signal/noise ratio, providing the interfering signal suppression which satisfies a predetermined expert opinion value.

MICROPHONE ARRAY; WANTED AND INTERFERING SPEECH SIGNALS; SIGNAL/NOISE RATIO; SIGNAL SUPPRESSION.

Микрофонные решетки представляют собой набор приемников акустических сигналов, объединенных в массив и обеспечивающих заданную диаграмму направленности акустических антенн [1].

В [2] рассмотрена настройка микрофонной решетки, принимающей широкополосные акустические сигналы одновременно от двух источников. При *точно* известных направлениях прихода сигналов настроенная решетка обеспечивает полное подавление сигнала, приходящего по одному угловому направлению, и неискаженный прием сигнала, приходящего по

другому угловому направлению.

В [3] описан способ определения направлений прихода плоских звуковых волн от двух источников при их одновременном воздействии на микрофонную решетку. Способ заключается в адаптации метода Кейпона [4, 5] для широкополосного сигнала. Показано, что при высоком отношении сигнал/шум (ОСШ) и, в частности, при отсутствии собственных шумов имеет место точное определение направлений прихода широкополосных акустических сигналов, что, в свою очередь, гарантирует их эффективное пространственное разделение (вы-

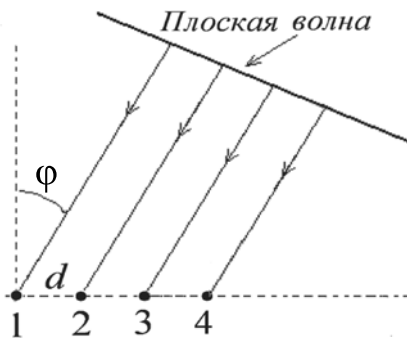


Рис. 1. Эквидистантная линейная решетка из четырех микрофонов

деление полезного сигнала при полном подавлении мешающего сигнала).

В данной статье исследуется влияние собственных шумов решетки на эффективность пространственной обработки широкополосных речевых сигналов.

Влияние собственных шумов решетки на точность определения направлений прихода сигналов

Для оценки влияния собственных шумов решетки на точность определения направ-

лений прихода сигналов были проведены модельные эксперименты с использованием среды Matlab. В процессе эксперимента создали два речевых сигнала и имитировали процесс совместного воздействия этих сигналов на эквидистантную решетку из четырех идентичных ненаправленных микрофонов (рис. 1) с коэффициентами передачи, равными единице.

Расстояние между микрофонами было выбрано равным $d = 0,05$ м, истинные направления на источники сигналов равнялись $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$. В ходе эксперимента задавалось требуемое численное значение ОСШ η . Далее генерировался белый (гауссовский) шум такой мощности, чтобы отношение мощности одного из речевых сигналов к мощности шума равнялось заданному значению ОСШ. После имитации совместного воздействия двух речевых сигналов на решетку из четырех микрофонов к «смеси» сигналов с выхода каждого микрофона добавлялся сгенерированный белый шум. Результирующие сигналы, содержавшие «смесь» белого шума и двух речевых сигналов, подвергались обработке по моди-

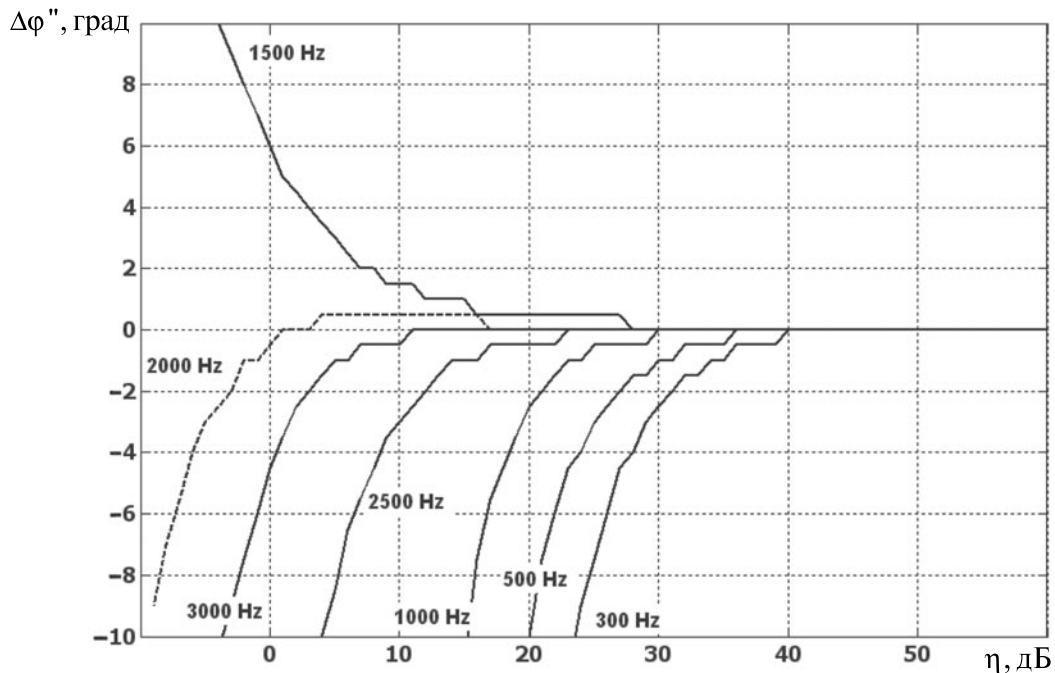


Рис. 2. Зависимости ошибки в определении направления прихода сигнала от ОСШ для углов $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$

фицированному методу Кейпона [3].

Рассмотрим полученные в ходе моделирования графики зависимостей ошибки в определении направления прихода мешающего широкополосного сигнала от ОСШ $\Delta\varphi''(\eta_{\text{дб}})$ на разных частотах (рис. 2).

Как следует из рисунка, для всех частот уменьшение ОСШ приводит к увеличению ошибки в определении направления прихода сигнала. На низких частотах ошибка появляется при больших значениях ОСШ и при уменьшении ОСШ быстрее возрастает. Ошибка в определении направлений прихода сигналов влечет за собой неполное

подавление мешающего сигнала.

Влияние собственных шумов решетки на степень подавления мешающего сигнала

Если реальный угол падения мешающего сигнала отличается от угла настройки, то отклик настроенной решетки будет содержать не только полезный, но и ненулевой мешающий сигнал. Степень подавления мешающего сигнала, т. е. отношение мощности мешающего сигнала на входе решетки к мощности мешающего сигнала на выходе решетки, может быть рассчитана по следующей формуле [6]:

$$\Delta A_{\text{дб}}'' = -20 \cdot \lg \left| \frac{1 - \exp \left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin(\varphi'' + \Delta\varphi''))}{c} \right)}{1 - \exp \left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin \varphi')}{c} \right)} \right|, \quad (1)$$

где c — скорость распространения звуковой волны; d — расстояние между микрофонами; φ' и φ'' — углы прихода сигналов от первого и второго источников соответственно; $\Delta\varphi''$ — ошибка в определении направления на источник мешающего сигнала; ω — циклическая частота; j — мнимая единица.

На рис. 3 представлены рассчитанные

по (1) зависимости степени подавления мешающего сигнала от ошибки в определении его направления прихода на разных частотах. Истинные направления прихода сигналов: $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$. Прочие параметры: скорость звука $c = 340$ м/с, расстояние между микрофонами $d = 0,05$ м.

Как видно из рисунка, даже при незна-

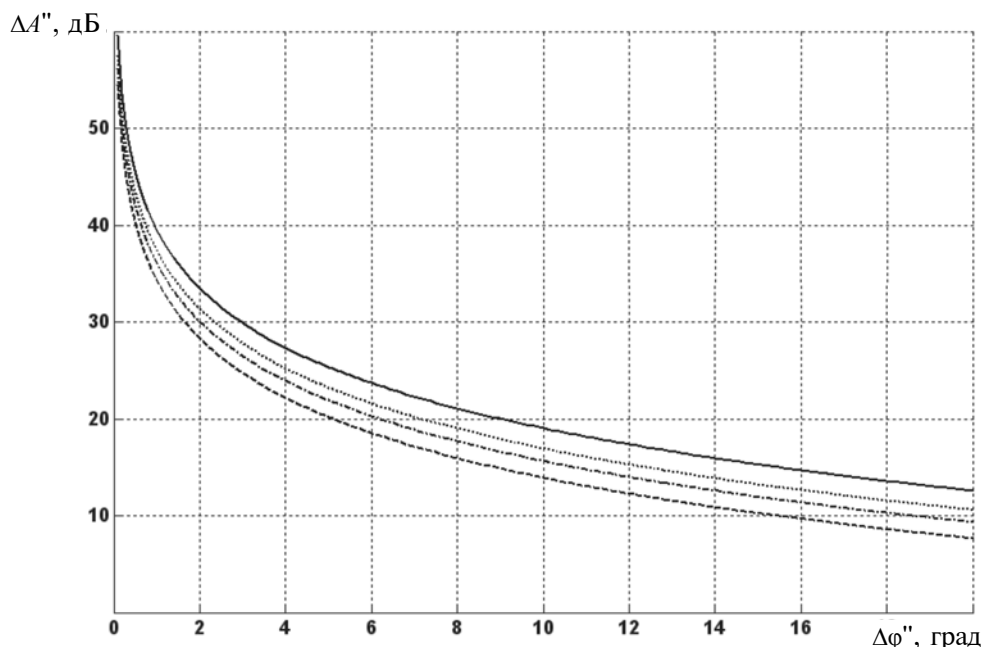


Рис. 3. Зависимости степени подавления мешающего сигнала от ошибки в определении его направления прихода для углов $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$
(—) 300 Гц; (.....) 1000 Гц; (---) 2000 Гц; (-----) 2500 Гц

чительной ошибке в определении направления на источник мешающего сигнала степень подавления мешающего сигнала становится отличной от бесконечности. С увеличением ошибки для всех частот степень подавления мешающего сигнала уменьшается.

Совмещая зависимости $\Delta\varphi''(\eta_{\text{дБ}})$, полученные с помощью моделирования (рис. 2), и зависимости $\Delta A_{\text{дБ}}''(\Delta\varphi'')$, рассчитанные по (1), получаем результирующие графики степени подавления мешающего сигнала от ОСШ (рис. 4) для каждой частоты. Реальные направления прихода сигналов остаются прежними: $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$.

Поясним содержание графиков, представленных на рис. 4.

1. Для больших значений ОСШ ошибка в определении направления прихода сигнала равна нулю, в связи с чем степень подавления мешающего сигнала стремится к бесконечности. Соответственно, для каждого из графиков, т. е. для каждой частоты, можно определить максимальное ОСШ $\eta_{\text{дБ max}}$, при превышении которого ошибка $\Delta\varphi''$ скачком изменяется до нуля, а значение $\Delta A_{\text{дБ}}''$ устремляется к бесконечности.

2. Для малых значений ОСШ ошибка в определении направления прихода сильно возрастает. Соответственно, на каждой частоте можно определить минимальное ОСШ $\eta_{\text{дБ min}}$, ниже которого решетка не способна определить, что на нее воздействуют два источника. Таким образом, каждый из графиков $\Delta A_{\text{дБ}}''(\eta_{\text{дБ}})$ построен для значений $\eta_{\text{дБ}}$, лежащих в интервале $\eta_{\text{дБ min}} \div \eta_{\text{дБ max}}$.

3. Как следует из рис. 4, степень подавления мешающего сигнала уменьшается с уменьшением ОСШ. Собственный шум решетки оказывает отрицательное влияние в большей степени на частоты, лежащие на краях диапазона $300 \div 3000$ Гц. При этом особенно чувствительными к воздействию собственного шума оказываются низкие частоты: 300 и 500 Гц.

Заметность мешающего сигнала при ошибочной настройке решетки

Для исследования субъективной оценки заметности мешающего сигнала, подавленного не полностью при ошибочной настройке решетки, были проведены экспертные статистические испытания. В качестве исходного материала использовалась аудиозапись сигналов, полученных с выхо-

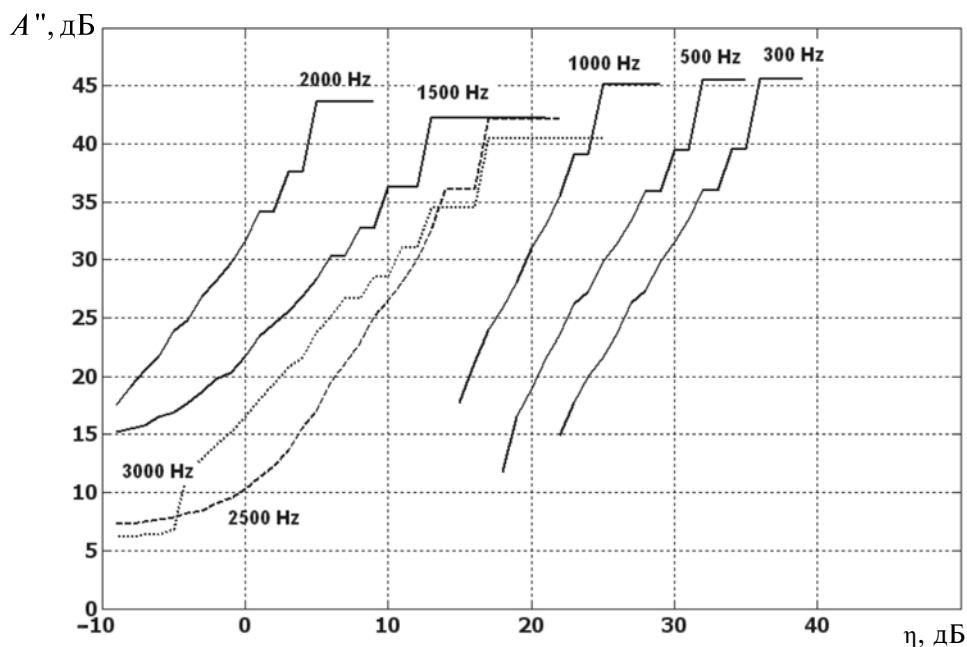


Рис. 4. Зависимости степени подавления мешающего сигнала от ОСШ для углов $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$

да двух имитированных микрофонов. Эти сигналы представляли собой смесь двух голосов дикторов, находившихся под разными точно известными углами к решетке $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$ и говоривших одновременно. В ходе каждого испытания задавалось отклонение от истинного направления на источник мешающего сигнала. С учетом этого отклонения формировался результирующий сигнал, прошедший обработку в «ошибочно» настроенной решетке и содержащий смесь полезного и мешающего сигнала, подавленного не полностью. Затем задавалось новое значение отклонения, и формировался новый результирующий сигнал.

Полученная совокупность сигналов прослушивалась по очереди через головные телефоны и субъективно оценивалась экспертами: преподавателями и студентами Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения (СПбГИКиТ) в общем количестве 92 человека. Перед каждым из экспертов была поставлена задача оценить заметность мешающего сигнала, звучащего на фоне речи

целевого диктора. Для оценки заметности искажений, в соответствии с рекомендацией ITU-R BS.1284-1 [7], использовалась 5-балльная шкала со следующими градациями: 5 — искажения незаметны; 4 — искажения заметны, но не мешают; 3 — искажения немного мешают; 2 — искажения мешают и раздражают; 1 — искажения сильно мешают. Оценки, выставленные экспертами, далее подвергались статистической обработке.

Усредненные результаты субъективных оценок заметности мешающего сигнала и доверительные интервалы представлены в виде графика на рис. 5.

Полученная зависимость оценки заметности мешающего сигнала от ошибки решетки в совокупности с графиками $\Delta\varphi''(\eta_{\text{дб}})$ (рис. 2) и $\Delta A_{\text{дб}}''(\eta_{\text{дб}})$ (рис. 4) может использоваться в следующих задачах. Задача первого типа: найти такое ОСШ, при котором обеспечивается заданное значение оценки заметности мешающего сигнала. Задача второго типа дуальна первой.

Рассмотрим пример решения задачи первого типа. Сначала задаемся произволь-

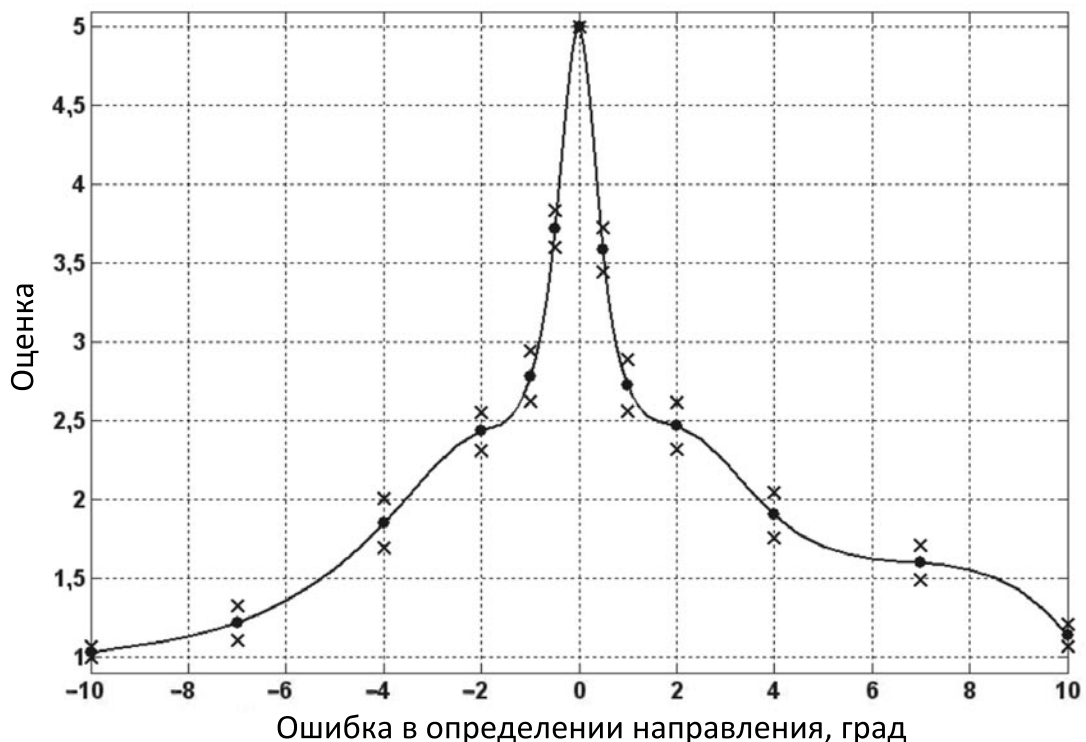


Рис. 5. Зависимость оценки заметности мешающего сигнала от ошибки в определении направления на мешающий источник

ной оценкой, например, со значением 4 (мешающий сигнал заметен, но не мешает). По графику на рис. 5 находим соответствующую этой оценке ошибку решетки (примерно 0,5 градуса). Далее по графику $\Delta\varphi(\eta_{\text{дб}})$ на рис. 2 устанавливаем предельное значение ОСШ, выше которого ошибка решетки меньше или равна 0,5 градуса. Так, для частотной компоненты 300 Гц, наиболее чувствительной к воздействию собственного шума решетки, предельное значение ОСШ равно 35 дБ. Наконец, анализируя зависимость $\Delta A_{\text{дб}}(\eta_{\text{дб}})$ на рис. 4, получаем, что при ОСШ, равном 35 дБ, на частоте 300 Гц обеспечивается подавление мешающего сигнала примерно на 46 дБ. На практике, исходя из требований психоакустики [8, 9] к степени подавления мешающего сигнала, в

каждом отдельно взятом случае предельное ОСШ можно устанавливать для той частотной компоненты полезного сигнала, модуль которой имеет наибольшее значение.

Собственный шум решетки вносит погрешность в определение направлений на источники сигналов, в результате чего в процессе пространственного разделения мешающий сигнал оказывается подавленным не полностью. Зависимость оценки заметности мешающего сигнала от ошибки решетки совместно с графиками $\Delta\varphi(\eta_{\text{дб}})$ и $\Delta A_{\text{дб}}(\eta_{\text{дб}})$ дает возможность найти предельное отношение сигнал/шум, при котором обеспечивается подавление мешающего сигнала, удовлетворяющее заданному значению экспертного мнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столбов М.Б. Применение микрофонных решеток для дистанционного сбора речевой информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 661–675.
2. Кривошейкин А.В., Перельгин С.В. Микрофонная решетка для реализации направленной акустической антенны // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 3. С. 221–225.
3. Кривошейкин А.В., Перельгин С.В., Смирнов И.Н., Иванова А.Ф. Анализ работы микрофонной антенной решетки для широкополосных акустических сигналов // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 1(59). С. 66–68.
4. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // Proc. IEEE. 1969.

Vol. 57. No. 8. Pp. 1408–1418.

5. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой: Учеб.-метод. материалы. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2007. 98 с.
6. Кривошейкин А.В., Перельгин С.В. Моделирование микрофонной антенной решетки // Мир техники кино. 2015. № 1(35). С. 22–26.
7. Rec. ITU-R BS.1284-1. General methods for the subjective assessment of sound quality. 1997–2003.
8. Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А., Щевьев Ю.П. Акустика: Учебник для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2009. 660 с.
9. Вахитов Я.Ш. Слух и речь: конспект лекций по курсу «Электроакустика». Л.: Изд-во ЛИКИ, 1973. 122 с.

REFERENCES

1. Stolbov M.B. Primeneniye mikrofonnykh reshetok dlya distantsionnogo sbora rechevoy informatsii [Application of microphone arrays for distant speech capture]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2015, Vol. 15, No. 4, Pp. 661–675. (rus)
2. Krivosheykin A.V., Perelygin S.V. Mikrofonnaya reshetka dlya realizatsii napravlennoy akusticheskoy antennoy [Microphone array for directional acoustic antenna implementation]. *Izv. vuzov. Priroostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 2015, Vol. 58, No. 3,

Pp. 221–225. (rus)

3. Krivosheykin A.V., Perelygin S.V., Smirnov I.N., Ivanova A.F. Analiz raboty mikrofonnoy antennoy reshetki dlya shirokopolosnykh akusticheskikh signalov [Analysis of the antenna array microphone for broadband acoustic signals]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii* [Control Systems and Information Technology], 2015, No. 1(59), Pp. 66–68. (rus)
4. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Proc. IEEE*, 1969, Vol. 57, No. 8, Pp. 1408–1418.
5. Yermolayev V.T., Flaksman A.G. *Metody otsenivaniya parametrov istochnikov signalov i*



pomekh, prinyimayemykh antennoy reshetkoy [Methods of estimating the parameters of signal sources and interference received by the antenna array]. Nizhniy Novgorod: NNGU Publ., 2007, 98 p. (rus)

6. **Krivosheykin A.V., Perelygin S.V.** Modelirovaniye mikrofonnoy antennoy reshetki [Microphone array modeling]. *Mir tekhniki kino*, 2015, No. 1(35), Pp. 22–26. (rus)

7. *Rec. ITU-R BS.1284-1. General methods for the*

subjective assessment of sound quality, 1997–2003.

8. **Vakhitov Sh.Ya., Kovalgin Yu.A., Fadeyev A.A., Shchevyev Yu.P.** *Akustika* [Acoustics]. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2009, 660 p. (rus)

9. **Vakhitov Ya.Sh.** *Slukh i rech: konspekt lektsiy po kursu Elektroakustika* [Hearing and speech: the abstract of lectures on Electroacoustics]. Leningrad: LIKI Publ., 1973, 122 p. (rus)

ПЕРЕЛЫГИН Сергей Васильевич — ассистент кафедры радиотехники и информационных технологий факультета технологий кино и телевидения Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения.

191119, Россия, Санкт-Петербург, ул. Правды, д. 13.

E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

PERELYGIN Sergey V. *St. Petersburg State University of Film and Television.*

191119, Pravdy Str. 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

КРИВОШЕЙКИН Анатолий Валентинович — профессор кафедры радиотехники и информационных технологий факультета технологий кино и телевидения Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, доктор технических наук.

191119, Россия, Санкт-Петербург, ул. Правды, д. 13.

E-mail: krivAV@yandex.ru

KRIVOSHEYKIN Anatoly V. *St. Petersburg State University of Film and Television.*

191119, Pravdy Str. 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: krivAV@yandex.ru

DOI: 10.5862/JCSTCS.234.2

УДК 681.141.2

А.В. Богданов, И.Г. Малыгин

ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ МУЗЕЙНЫХ И ВЫСТАВОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

A.V. Bogdanov, I.G. Malygin

TECHNOLOGY INFORMATION SECURITY OF LARGE MUSEUM AND EXHIBITION COMPLEXES

Выявлена роль и значение информационной безопасности в духовной жизни общества. Проанализированы особенности обеспечения безопасности информационных систем крупных музейных комплексов. Обоснованы состав и структура интегрированной информационной системы обеспечения безопасности музея. Рассмотрены модели функционирования и управления системой защиты информации. Предложен метод моделирования и оценки свойств устойчивости функционирования информационной системы обеспечения безопасности крупных музейных и выставочных комплексов.

МУЗЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС; ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ; СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ; МОДЕЛЬ; УСТОЙЧИВОСТЬ.

The paper substantiates the role and importance of information security in the spiritual life of the society, analyses the specifics of the security of large museum complexes, as information systems. We have described the composition and the structure of an integrated information system for ensuring the safety of a museum. Models for operating and managing an information security system have been considered.

MUSEUM COMPLEX; INFORMATION SECURITY; INFORMATION SECURITY SYSTEM; MODEL; STABILITY.

Основными задачами, решаемыми при создании системы безопасности крупных музейных и выставочных комплексов (КМиБК), в общем виде являются [1]:

1) определение целей охраны музейного учреждения и сохранности музейных предметов;

2) постановка задач составным частям системы безопасности;

3) определение возможности построения организационно-технического комплекса безопасности, охватывающего все составные части системы обеспечения безопасности;

4) использование современных технических средств и новых достижений в области безопасности;

5) определение вида охраны;

6) определение уровня и степени надежности с обоснованием экономической целесообразности.

Отличительная особенность построения системы безопасности музейного учреждения, по сравнению с любыми другими объектами, — обеспечение защищенности музейного учреждения по двум равнозначным и важным направлениям:

обеспечение охраны вверенного в управление государственного имущества (территория, здания, сооружения, помещения, отдельные предметы и коллекции и др. материальные ценности и имущество);

обеспечение сохранения объектов культурного наследия и поддержание сохранности музейных предметов.

Такая защищенность должна обеспечиваться в режиме публичного представления музейных предметов и при непрерывной эксплуатации помещений, зданий, сооружений и памятников музейных учреждений, а также природно-ландшафтных территорий.



Рис. 1. Комплексный подход к организации безопасности музейного учреждения

Для обеспечения максимальной защищенности на практике применяется комплексный подход к организации системы безопасности музейного учреждения, включающий в себя совокупность мер, направленных на всестороннее пресечение возможных угроз (рис. 1).

Обобщенная структурная схема современной системы безопасности представлена на рис. 2. Ее основой является система сбора и обработки информации.

Кроме того, в ее состав входят средства контроля состояния объекта (в частности, средства наблюдения, инженерно-технические средства защиты, защиты информации, контроля технологического оборудования и т. д.); окружающей среды; управления; контроля и управления доступом к объекту информатизации, к инфор-

мации и к системе безопасности; передачи информации; оповещения; отображения информации; регистрации данных; противодействия и ликвидации угроз; энергопитания, объединенные каналами связи. Перечень средств контроля состояния объекта будет определяться перечнем угроз. Основными функциональными элементами системы безопасности, определяющими ее основные параметры и эффективность, являются:

- средства обнаружения;
- средства сбора и обработки информации;
- средства противодействия угрозам;
- соответствующие каналы связи.

Таким образом, современный этап развития проблемы безопасности сложных организационно-технических объектов ха-



Рис. 2. Обобщенная структурная схема системы безопасности

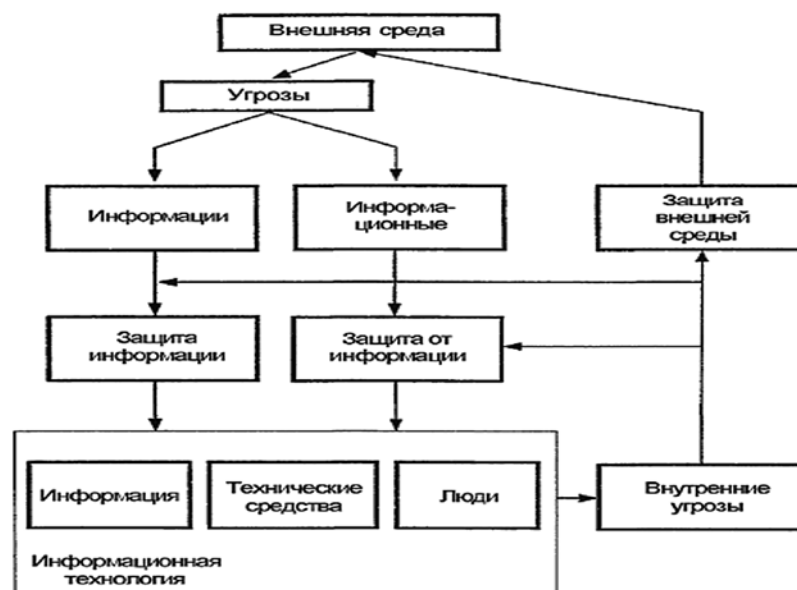


Рис. 3. Объекты защиты информации и угрозы информационной безопасности

рактизуется переходом от традиционного ее представления как проблемы физической защиты к более широкому пониманию — проблеме безопасности информационной сферы. При этом выделяют три основных направления (объекта) защиты от информационного воздействия: технические средства; информация; человек (рис. 3).

Методика обеспечения безопасности

Современное состояние проблемы безопасности важных объектов, к которым вполне обоснованно относятся КМиВК, определяется множеством факторов. Одним из важных факторов, доминирующих в последнее время, является изменение характера угроз, вызванное повсеместной информатизацией во всех областях жизнедеятельности государства [2]. Угрозами в области духовной жизни и информационной деятельности могут являться: дезорганизация и разрушение системы накопления и сохранения культурных ценностей, включая архивы. В КМиВК движение информации в общем случае происходит в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.

Очевидный путь простого увеличения технической оснащенности систем безопасности, без учета информационных особенностей и нюансов проблемы, как правило,

не приводит к желаемым результатам.

Предлагаемые сегодня концепции безопасности, являясь, несомненно, полезными и выверенными с точки зрения охраны, чаще всего не учитывают музейную специфику, предполагающую рассмотрение проблемы, как проблемы информационно-технической, обеспечивающей не только интересы и структуру безопасности как таковую, но и (взаимосвязь ее с социологиче-



Рис. 4. Общая схема информационного процесса КМиВК



ской организацией коллектива) интересы как посетителей, так и работников музея.

Создание интегрированной системы безопасности (ИСБ), обеспечивающей качественное повышение уровня защищенности объектов культуры с учетом всех аспектов безопасности, предусматривает все возможные организационные, социальные и технические мероприятия, позволяющие исключить или уменьшить риск утраты предметов коллекций, дезорганизации работы музея, искажения его информационного облика или, что еще лучше, ликвидировать предпосылки к таким возможностям.

Реализация концепции ИСБ предполагает постоянный мониторинг организационно-технических мероприятий, обеспечивающих:

- всестороннюю защиту всего архитектурного комплекса зданий, представляющих историческую ценность;
- создание условий для сохранности экспонатов, включающих в себя: защиту от краж, вандализма, возможности подмены произведений искусства на различных этапах жизненного цикла, поддержание необходимых климатических параметров (температуры, влажности), обеспечение биологической и химической защиты, реализацию плана эвакуационных мероприятий и действий в чрезвычайных ситуациях;
- защиту информационных ресурсов музея.

Системообразующим элементом ИСБ целесообразно рассматривать комплексную информационную систему, формирующую информационное пространство музея, являющуюся интегрирующим фактором всей ИСБ. Правильно организованное защищенное информационное пространство музея позволит обеспечить достаточную безопасность и при этом создать условия для нормального восприятия архитектурных и художественных ценностей, которые широко представлены в КМиВК.

Мировой опыт создания систем защиты для КМиВК позволяет выделить три основных элемента, входящих в состав любого объекта и требующих обеспечения их безопасности:

1) люди — персонал и посетители, сотрудники охраны;

2) материальные ценности, имущество, оборудование;

3) информация.

Выделенные элементы полностью совпадают с выявленными выше объектами обеспечения информационной безопасности, что подтверждает доминирование этих аспектов в комплексном решении проблемы безопасности.

Каждый из выделенных элементов имеет свои особенности, которые необходимо учесть при определении возможных угроз, каковыми являются:

- чрезвычайные обстоятельства, в том числе пожары;
- несанкционированное проникновение;
- несанкционированный доступ к информации.

Таким образом, под угрозой безопасности крупных музейных комплексов следует понимать событие, действие, процесс или явление, которое посредством воздействия на людей, материальные ценности и информацию может привести к нанесению ущерба объекту, нарушению или прекращению функционирования объекта.

Обеспечение безопасности объекта не может быть однократным актом. Это непрерывный процесс, заключающийся в обосновании и реализации наиболее рациональных методов, способов и путей создания, совершенствования и развития интегрированной системы безопасности, непрерывном контроле, выявлении ее слабых мест.

Реализация такого подхода обеспечит:

- получение объективной оперативной информации о состоянии объекта в форме, удобной для оператора системы;
- предоставление оператору возможности принять на основе этой информации правильное решение о реагировании на тревожные и аварийные ситуации и задействовать соответствующие службы реагирования;
- фиксирование в протоколе системы всех событий, представляющих интерес для службы безопасности (подразделения пожарной или вневедомственной охраны), с

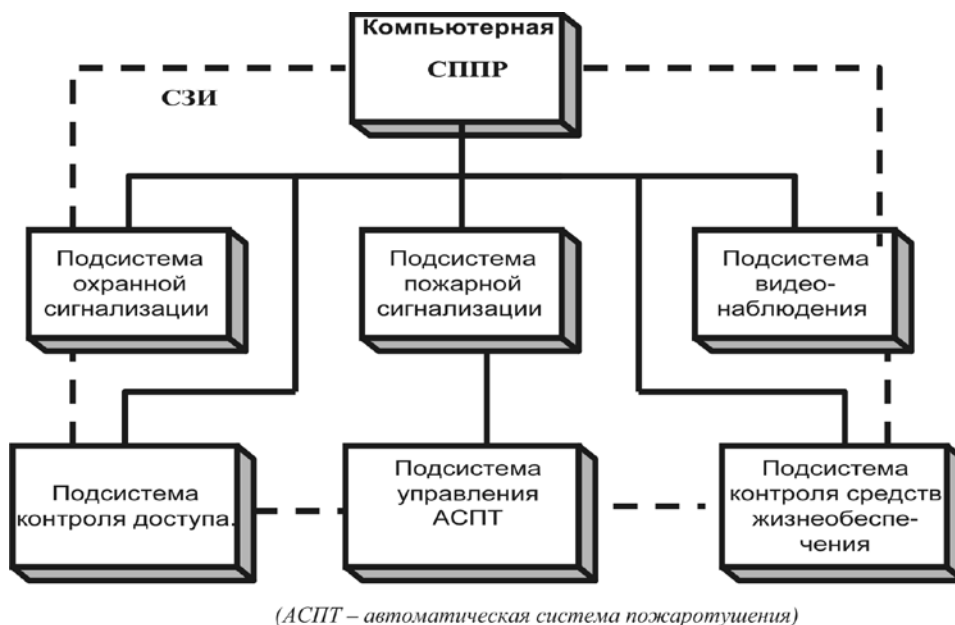


Рис. 5. Обобщенная структура ИСБ КМиВК

целью последующего их анализа;

- повышение надежности и самодиагностики системы за счет дублирования разными подсистемами основных функций оповещения, сохранения информации, ее оперативной обработки и последующего анализа;

- повышение устойчивости системы к саботажным действиям путем совмещения на особо важных участках объекта технических средств различных подсистем, которые не могут быть выведенными из строя одновременно;

- простоту эксплуатации и автоматизацию рутинных действий сотрудников охраны, что позволит им сосредоточить внимание на выполнении своих основных функций по предотвращению последствий нештатных ситуаций.

Анализ структуры системы безопасности

Обобщенная структура ИСБ на основе компьютерной системы поддержки принятия решения (СППР) представлена на рис. 5.

Выделение в качестве системообразующего элемента СППР позволяет определить ИСБ как информационную систему обеспечения безопасности (ИСОБ), что обуславливает актуальность первоочередного

решения задач защиты информации.

Система защиты информации (СЗИ) в самом общем виде может быть определена как организованная совокупность всех средств, методов и мероприятий, выделяемых (предусматриваемых) на объекте информатизации (ОИ) КМиВК для решения в ней выбранных задач по защите. Введением понятия СЗИ определяется тот факт, что все ресурсы, выделяемые для защиты информации, должны объединяться в единую, целостную систему, которая является функционально самостоятельной подсистемой любого ОИ. К СЗИ предъявляется целый ряд более конкретных, целевых требований (см. рис. 6).

Способность СЗИ эффективно противодействовать деструктивным воздействиям предполагает своевременное разрешение ряда задач: выявление основных угроз для СЗИ; разработку концепции безопасности СЗИ; определение плана конкретных мероприятий по реализации этой концепции; проектирование СЗИ; создание механизма согласования действий всех подразделений и должностных лиц, занимающихся обеспечением безопасности; постоянный мониторинг состояния СЗИ.

Исходя из предположения, что воздействие на защищаемую информацию (нару-



Рис. 6. Требования к системе защиты информации

шение целостности, несанкционированное получение и копирование, хищение, нарушение защищенности) может происходить как на самом объекте, так и при передаче ее по каналам связи, разработана общая модель СЗИ, представленная на рис. 7. Входные сигналы, поступающие в систему защиты информации и преобразующиеся в ней, можно разделить на полезные, несущие конфиденциальные сведения — $x_n(t)$, и сигналы, воздействующие на систему защи-

ты и направленные на изменение структуры конфиденциальных данных или снижение эффективности системы защиты — $x_m(t)$.

При этом под общим названием «сигнал» понимаются сигналы, образы, символы, технические решения и процессы, содержащие конфиденциальные сведения. Сигналы $x_m(t)$ определяются множеством угроз информации (отказы, сбои, ошибки функционирования, стихийные бедствия и др.). Функциональными назначениями системы

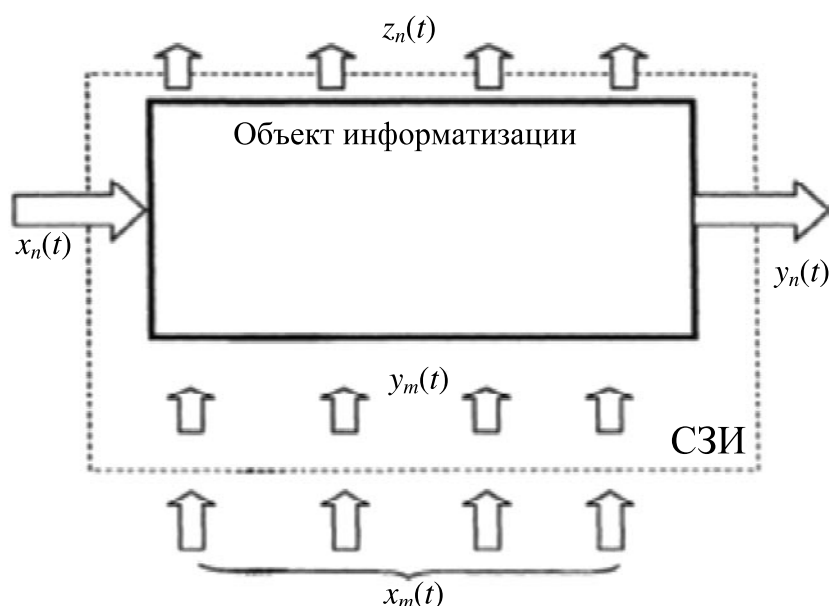


Рис. 7. Общая модель системы защиты информации



Рис. 8. Обобщенная модель процесса защиты информации

защиты информации являются перекрытие каналов несанкционированного доступа и утечки информации. Математически это можно представить преобразованием сигнала $x_n(t)$ в форму либо не доступную для раскрытия содержания конфиденциальных сведений — $y_n(t)$, либо не позволяющую распознать информационный сигнал — $z_n(t)$, а сигнала $x_m(t)$ — в форму, не оказывающую разрушающего воздействия на полезный сигнал — $y_m(t)$, то есть выполнить функцию нейтрализации вредных воздействий: $y_n(t) = f_1(x_n(t))$, $z_n(t) = f_2(x_n(t))$, $y_m(t) = f_3(x_m(t))$ [6].

Системное представление проблемы обеспечения безопасности возможно на основе обобщенной модели процесса защиты информации (рис. 8).

Возможность реализации процессов защиты информации, характеризующихся соответствующими показателями, во многом определяется эффективностью управления процессами функционирования СЗИ. Общая модель управления защитой информации представлена на рис. 9. Как следует из представленной модели, исходной основой для управления защитой служат планы обработки информации, а на основе анализа параметров подлежащей обработке информации обосновываются требования к защите информации, которые в самом общем виде

могут быть выражены вероятностью требуемой защиты $P_{тр}$. В соответствии с требуемым значением показателя защищенности должны быть определены оптимальные наборы средств защиты (технических {Т}, программных {П}, организационных {О}, законодательных {З}, морально-этических {М}), обеспечивающих требуемый уровень защищенности. Обоснование таких наборов средств защиты является общей задачей механизмов управления средствами защиты. Выбранные наборы средств защиты способны обеспечить вполне определенный ожидаемый уровень защищенности информации ($P_{ож}$), который может отличаться от требуемого.

Если это отличие будет превышать допустимые значения ($P_{доп}$), то, очевидно, надо скорректировать выбранные наборы средств защиты.

Обсуждение предлагаемой методики

Перечисленные средства обеспечения безопасности можно рассматривать как последовательность барьеров или рубежей защиты информации, комплексное использование которых в рамках ИСБ позволит обеспечить требуемый уровень безопасности КМиВК (рис. 10).

Критерием оптимизации СЗИ может быть минимизация затрат на реализацию СЗИ в КМиВК при условии обеспечения

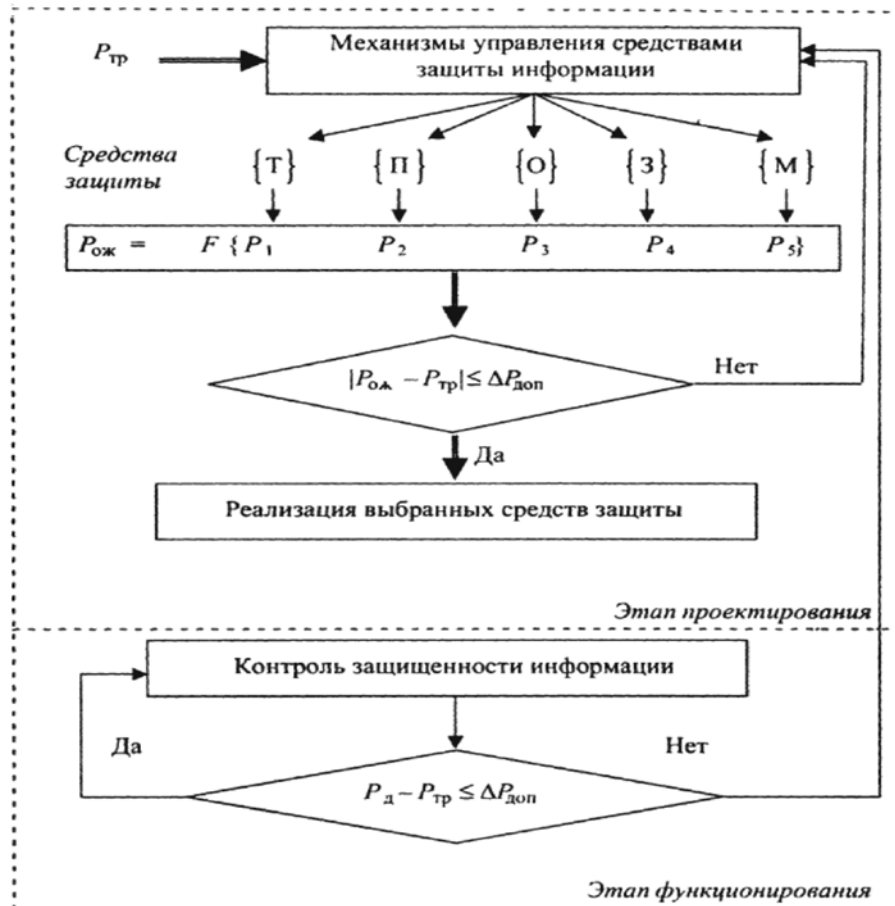


Рис. 9. Общая модель управления защитой информации



Рис. 10. Система рубежей защиты

заданных уровней защищенности информации от несанкционированных действий со стороны всех вероятных стратегий нападения [4], то есть

$$C = \sum_j C_j = \sum_j \sum_i d_{ij} S_i \rightarrow \min$$

$$\log P = U \leq U_0 = \log P_0,$$

где S_i — затраты на реализацию i -й меры;

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я мера защиты входит в } j\text{-й} \\ & \text{набор мер;} \\ 0, & \text{если } i\text{-я мера защиты не входит в } j\text{-й} \\ & \text{набор мер;} \end{cases}$$

$U = \log P$ — уровень защищенности информации в АСОД.

$$P = \sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^{m_k} \left(1 - q_i \sum_{j=1}^{n_k} P_{ij} \right),$$

где q_i — вероятность применения стратегии; S — число возможных подсистем стратегий нападения; m_k — число возможных стратегий нападения в составе k -й подсистемы нападения; n_k — число мер защиты, направленных на противодействие k -й подсистеме стратегий нападения; P_{ij} — вероятность преодоления j -й меры противодействия i -й стратегии нападения.

В качестве системы защиты принимается такой набор мер защиты R_i , для которого $C_i = \min\{C_j\}$.

В этом случае ИСОБ можно рассматривать как информационно-управляющую систему, обеспечивающую оперативное взаимодействие и реагирование сил и средств обеспечения безопасности КМВК, от устойчивости (надежности, живучести) функционирования которой во многом зависит реализация функций, возложенных на КМВК.

Создание и эксплуатация сложных ИСОБ предполагает широкое применение аналитических методов, основным содержанием которых является установление связей (зависимостей) между показателями устойчивости и соответствующими показателями устойчивости систем. Эти методы обладают следующими положительными свойствами:

абсолютной точностью (в рамках при-

нятых допущений);

представлением результата в явной аналитической форме;

возможностью использования моделей при решении оптимизационных задач.

К числу основных недостатков этих методов обычно относят:

большую размерность моделей;

упрощение моделей, не учитывающее всех особенностей исследуемых систем.

Следует заметить, что другим эффективным средством совершенствования методов моделирования является разработка комбинированных аналитико-статистических методов. Используемые в качестве базовых методов исследования устойчивости методы надежности можно классифицировать следующим образом:

1) методы, основанные на перечислении путей и сечений. Они различаются способами формирования путей и сечений, приемами ортогонализации, организацией вычислений и представлением промежуточных результатов. В наиболее законченном виде идея перечислений путей (сечений) воплощена в логико-вероятностном методе (ЛВМ);

2) методы, основанные на перечислении состояний графа. Они различаются способами формирования состояний, проверки наличия связанности в конкретном состоянии и вычислении результирующих, что позволяет как производить расчет соответствующих количественных характеристик устойчивости, так и использовать эти зависимости непосредственно в качестве целевых функций при решении задач оптимизации.

В случае громоздкости и трудоемкости проведения точных расчетов показателей надежности используются приближенные методы, которые можно, в общем случае, разделить на методы граничных оценок и методы частичного перебора состояний.

Среди известных в теории надежности средств математического моделирования, базирующихся на структурных схемах, в последнее время интенсивное развитие получил ЛВМ. Привлекательность этого метода заключается в исключительной четкости, однозначности и больших возможностях



анализа влияния отдельных элементов на устойчивость функционирования системы в целом. ЛВМ основывается на сопоставлении в моделях надежности элементам рассматриваемой системы логических (двоичных, булевых, переключательных) переменных: $\tilde{i} = \{i, \bar{i}\}$.

Здесь арифметическое значение переменной $i = \overline{1, N}$ соответствует порядковому номеру элемента в модели надежности системы.

Прямым логическим значением переменной $\tilde{i} = i$ будем обозначать событие, состоящее в том, что на рассматриваемом интервале времени функционирования системы соответствующий элемент проработал безотказно, или в данный момент времени этот элемент находится в состоянии собственной (независящей от состояния других элементов) работоспособности. Инверсной логической переменной $\tilde{i} = \bar{i}$ обозначается противоположное событие.

При рассмотрении возможности использования указанной логической модели функционального элемента в моделях живучести и отказоустойчивости необходимо отметить, что отличие от надежности здесь состоит, в основном, не в форме проявления изменений состояния элемента (и там, и там — нарушение или не нарушение способности элемента функционировать), а лишь в причинах возникновения этих событий и степени их детерминированности. Поэтому логическая форма представления функциональных элементов является вполне приемлемой в различных моделях устойчивости. Кроме того, простые случайные события, представляющие причины возникновения, распределения и характер воздействия поражающих факторов на функциональные элементы в моделях живучести, и причинно-следственные связи в моделях отказоустойчивости могут быть также сопоставлены двоичным переменным. Это позволяет говорить о принципиальной возможности использования арсенала логико-вероятностных средств теории надежности при разработке моделей отдельных и комплексных свойств устойчивости ИСОБ КМиВК.

Классический ЛВМ применяется для анализа систем, функционирование которых с достаточной, в рамках рассматриваемой задачи, точностью характеризуется статическими моделями надежности. Под статическими моделями будем понимать модели, в которых значения системных характеристик не зависят от реальной последовательности (порядка, очередности) случайных изменений состояний элементов и определяются только их составом, на рассматриваемом интервале времени, или в заданный момент времени функционирования системы. Кроме того, существующие приемы построения логико-вероятностных моделей надежности систем в большинстве случаев малопригодны для прямой реализации на ЭВМ в силу своей слабой формализации и исходной ориентации на ручное применение. Поэтому все более широкое распространение начинают получать разработки новых методов системного анализа, непосредственно ориентированные на машинную реализацию процессов моделирования. К этому классу относится общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ), используемый в качестве методологической базы автоматизированного моделирования. Он является развитием классического нотонного ЛВМ.

Необходимость обеспечения многовариантного и точного анализа устойчивости ИСОБ КМиВК в процессе их разработки, а также оперативного управления устойчивостью в процессе эксплуатации предполагает реализацию метода в виде автоматизированной системы моделирования и расчета показателей устойчивости, осуществляющей функции справочника, расчета, прогноза и анализа.

Возможности метода моделирования сложных систем могут быть значительно расширены за счет внедрения соответствующих процедур учета групп несовместных событий, заданной последовательности отказов элементов и расчета дополнительных характеристик надежности как не восстанавливаемых, так и восстанавливаемых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов А.В., Малыгин И.Г., Синешчук Ю.И. Неформальная модель нарушителя безопасности объектов культуры // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2013. № 3. С. 109–113. [электронный ресурс]/URL: vestnik.igps.ru
2. Корчагин С.И., Павлов В.Г., Бутов А.Н., Ткаченко Д.Г. Подходы к созданию систем обеспечения безопасности особо важных объектов // Системы безопасности. 2010. № 4.
3. Семкин С.Н., Беляков Э.В., Гребенев С.В., Козачок В.И. Основы организационного обеспечения информационной безопасности объектов информатизации: Учеб. пособие. М.: Гелиос АРВ, 2005.
4. Климов С.М. Методы и модели противодействия компьютерным атакам. Люберцы: КАТАЛИТ, 2008.

REFERENCES

1. Bogdanov A.V., Malygin I.G., Sineshchuk Yu.I. Neformalnaya model narushitelya bezopasnosti obyektov kultury [Informal model of the violator of security culture object], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii*, 2013, No. 3, Pp. 109–113. Available: vestnik.igps.ru
2. Korchagin S.I., Pavlov V.G., Butov A.N., Tkachenko D.G. Podkhody k sozdaniyu sistem obespecheniya bezopasnosti osobo vazhnykh obyektov [Approaches to the development of security systems of critical facilities]. *Sistemy bezopasnosti* [Systems of security], 2010, No. 4. (rus)
3. Semkin S.N., Belyakov E.V., Grebenev S.V., Kozachok V.I. *Osnovy organizatsionnogo obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti obyektov informatizatsii* [Fundamentals of organizational information security facilities information]. Moscow: Gelios ARV Publ., 2005. (rus)
4. Klimov S.M. *Metody i modeli protivodeystviya kompyuternym atakam* [Methods and models to counter computer attacks]. Lyubertsy: KATALIT Publ., 2008. (rus)

БОГДАНОВ Алексей Валентинович — доцент кафедры радиоэлектронных средств защиты информации Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: bogdanov@hermitage.ru

BOGDANOV Alexey V. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: bogdanov@hermitage.ru

МАЛЫГИН Игорь Геннадьевич — профессор Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН, доктор технических наук.

199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д. 13.

E-mail: malygin_com@mail.ru

MALYGIN Igor G. *IPT RAS.*

199178, 12th line of Vasilievsky Island, 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: malygin_com@mail.ru

*С.В. Перелыгин, Л.Х. Нурмухамедов*

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МИКРОФОННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

S.V. Perelygin, L.H. Nurmukhamedov

IMPROVING THE QUALITY OF SPEECH SIGNAL PROCESSING VIA A MICROPHONE ARRAY

Смоделирован процесс обработки широкополосного акустического сигнала с помощью микрофонной решетки применительно к задаче пространственного разделения двух акустических сигналов при их одновременном воздействии на решетку. Использовано взвешенное суммирование в частотной области; сделаны пороговые ограничения на весовые коэффициенты микрофонной решетки с целью минимизации искажений полезного сигнала, прошедшего обработку. По результатам экспертных статистических испытаний определены оптимальные пороговые значения весовых коэффициентов.

АКУСТИЧЕСКАЯ АНТЕННА; ШИРОКОПОЛОСНЫЙ СИГНАЛ; ПОЛЕЗНЫЙ И МЕШАЮЩИЙ СИГНАЛЫ; ИСКАЖЕНИЕ СИГНАЛА; ВЗВЕШЕННОЕ СУММИРОВАНИЕ; ПОРОГОВОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ; ЭКСПЕРТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ.

The topic of the article is about modeling broadband acoustic signal processing via a microphone array. The article solves the problem of tuning the microphone array to suppress the signal from the source at one angle and to receive the signal undistorted from the source at the other angle during the modeling. Weighted summation in the frequency domain is used; threshold limits are imposed on weight coefficients in order to minimize distortion of the useful signal during processing. The optimal threshold values of weighting coefficients have been determined according to the results of expert statistical tests. Setting these threshold values, we achieve the conditions when both the artifacts (hissing, whistling, ringing, clanging) and the wanted signal distortions (change in the voice timbre, muting consonants) are minimally noticeable.

ACOUSTIC ANTENNA; BROADBAND SIGNAL; WANTED AND INTERFERING SIGNALS; SIGNAL DISTORTION; WEIGHTED SUMMATION; THRESHOLD LIMIT; EXPERT EVALUATION.

Микрофонные решетки позволяют решать задачи пространственной фильтрации звука, что дает возможность принимать акустический сигнал выборочно, только по определенному одному или нескольким направлениям [1–5]. Настроенная решетка должна иметь минимальную чувствительность по направлению на мешающий источник, в то время как полезный сигнал (голос целевого диктора) должен быть принят и неискажен.

В радиотехнике известны способы решения данной задачи с помощью антенных решеток, принимающих радиосигналы [6–9]. Методы расчета антенных решеток

основаны на использовании моделей приема либо гармонического, либо узкополосного сигнала [6, 7]. Акустические сигналы являются широкополосными, что должно учитываться при решении задачи настройки микрофонной решетки.

Расчетные соотношения

Как показано в [10], уже при наличии двух идентичных ненаправленных микрофонов (случай вырожденной микрофонной решетки) можно осуществить пространственное разделение двух широкополосных сигналов, источники которых образуют углы φ' и φ'' относительно нормали к решетке (рис. 1).

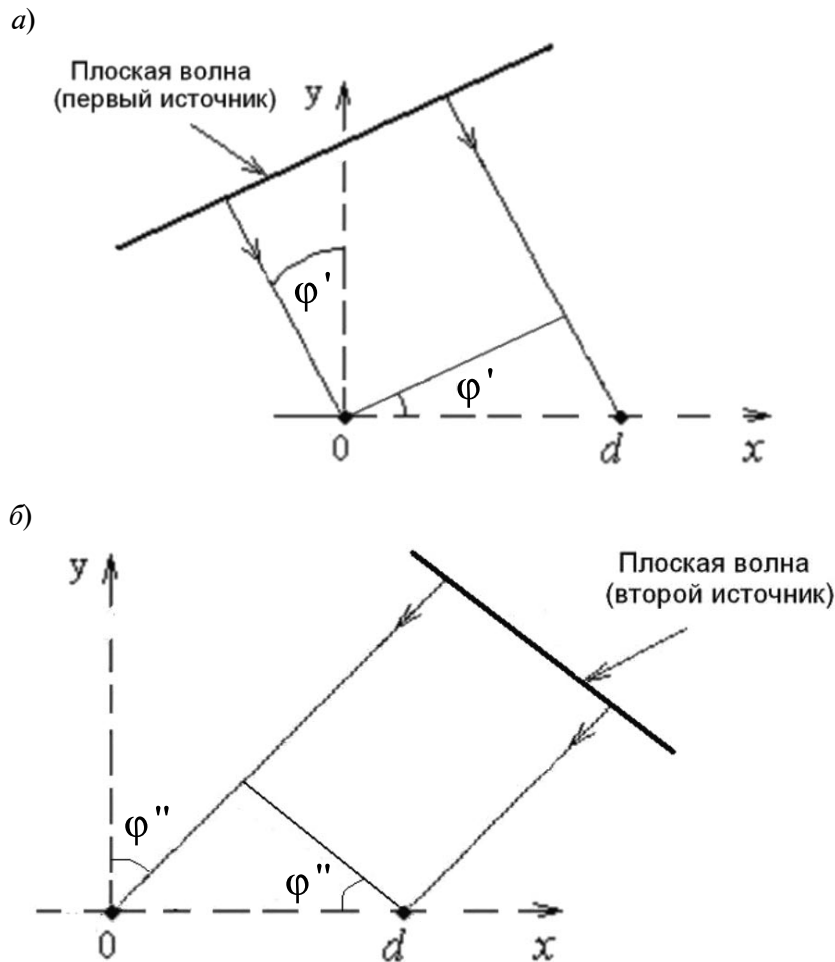


Рис. 1. Схема, поясняющая принцип работы решетки:
а – звуковая волна от первого источника; б – звуковая волна от второго источника

Для решения задачи применяется взвешенное суммирование принятых сигналов в частотной области и оговаривается, что воздействующие на решетку сигналы занимают одинаковый диапазон частот и имеют плоский волновой фронт. Сигнал на выходе настроенной решетки находится из соотношения [6, 10]:

$$\dot{S}(j\omega) = w_1(j\omega) \cdot \dot{S}_1(j\omega) + w_2(j\omega) \cdot \dot{S}_2(j\omega), \quad (1)$$

где $\dot{S}(j\omega)$, $\dot{S}_1(j\omega)$, $\dot{S}_2(j\omega)$ – спектральные плотности, соответственно, выходного сигнала, сигнала на выходе первого микрофона, сигнала на выходе второго микрофона; $w_1(j\omega)$, $w_2(j\omega)$ – частотно-зависимые весовые коэффициенты, рассчитываемые по следующим формулам [10]:

$$w_1(j\omega) = \frac{1}{1 - \exp\left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin \varphi')}{c}\right)}; \quad (2 \text{ а})$$

$$w_2(j\omega) = \frac{-\exp\left(j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right)}{1 - \exp\left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin \varphi')}{c}\right)}, \quad (2 \text{ б})$$

где c – скорость распространения звуковой волны; d – расстояние между микрофонами; φ' и φ'' – углы прихода сигналов от первого и второго источников, соответственно; ω – циклическая частота; j – мнимая единица.

Моделирование

В ходе моделирования с использованием среды Matlab был имитирован процесс

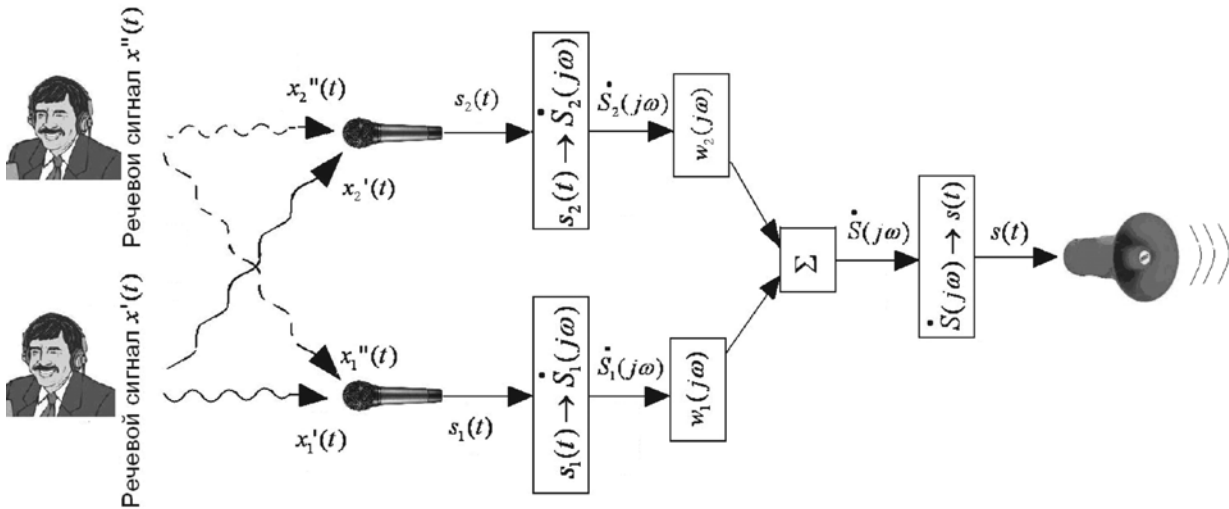


Рис. 2. Схема звукового тракта при проведении моделирования

прохождения сигналов через микрофонную решетку, состоящую из двух идентичных ненаправленных микрофонов. На рис. 2 схематично показан звуковой тракт, использованный при проведении моделирования.

В качестве исходного материала для моделирования применялись два речевых сигнала $x'(t)$ и $x''(t)$, создаваемые одним человеком. Тем самым были выполнены условия, когда оба источника излучают акустические широкополосные сигналы в одинаковом диапазоне частот.

На подготовительном этапе произвольно задавались углы φ' и φ'' . Формировалась группа сигналов: $x'(t)$ и $x''(t)$ — точная копия двух исходных сигналов, $s_1(t)$ — их сумма (звуковая смесь на выходе первого микрофона), $x_2'(t) = x_1'(t - \tau')$ и $x_2''(t) = x_1''(t - \tau'')$ — сигналы, сдвинутые по времени относительно исходных сигналов на величины τ' и τ'' , определяемые углами φ' и φ'' , $s_2(t)$ — их сумма (звуковая смесь на выходе второго микрофона). Таким способом имитировался процесс прохождения звукового сигнала через первый и второй микрофоны.

На этапе обработки вычислялись весовые коэффициенты по формулам (2 а) и (2 б). Методом выборок с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) осуществлялся переход в частотную область

$s_1(t) \rightarrow \dot{S}_1(j\omega)$, $s_2(t) \rightarrow \dot{S}_2(j\omega)$. Использовались ДПФ со следующими параметрами: частота дискретизации 48 кГц, количество отсчетов 2048, временной период 42,7 мс, окно Ханна. Для спектра каждой выборки производилось взвешенное суммирование в соответствии с (1). В завершение данного этапа осуществлялся обратный переход из частотной области во временную $\dot{S}(j\omega) \rightarrow s(t)$, формируя результирующий сигнал из набора его выборок.

На этапе субъективного оценивания результатов выполнялось прослушивание и сравнение между собой сигналов $s(t)$ и $x_1'(t)$.

Результаты моделирования

Поскольку решетка была настроена на заранее известные углы φ' и φ'' , то, как и ожидалось, в отклике решетки отсутствовал мешающий сигнал. Одновременно были выявлены искажения полезного сигнала в виде шипения и свиста.

Рассмотрим причины появления таких искажений. В процессе моделирования в подаваемом на решетку сигнале неизбежно присутствуют шумы помещения, собственные шумы микрофонов и шумы квантования. Можно предположить, что появление искажений возникает на тех частотах, для которых модули весовых коэффициентов имеют большие значения, что приводит к

подчеркиванию шумовых составляющих в сигнале.

При работе с широкополосными сигналами возникают критические случаи для набора частот, для которых знаменатели в (2 а) и (2 б) обращаются в нуль, а абсолютные значения весовых коэффициентов обращаются в бесконечность. Из (2 а) и (2 б) следует, что такие частоты «всплеска» равны:

$$f = \frac{c}{d |(\sin \varphi'' - \sin \varphi')|} k, k = 0, 1, 2 \dots \quad (3)$$

Для борьбы с отмеченными артефактами предлагается использовать метод порогового оценивания, т. е. ограничить сверху значение модуля весового коэффициента и субъективно оценить произошедшие изменения в обработанном сигнале. Если при расчете по формулам (2 а) и (2 б) весовой коэффициент по модулю получается выше порогового значения, то ему присваивается значение, равное пороговому.

Для проверки выдвинутой гипотезы был проведен модельный эксперимент по определению максимального порогового значения, при котором еще не слышны вносимые искажения звука (свист и шипение). Эксперимент показал правильность выдвинутой гипотезы и существование

порогового значения весового коэффициента, удовлетворяющего требованию отсутствия искажения звука. Одновременно оказалось, что если пороговое значение выбрать слишком маленьким, то в самом речевом сигнале возникают искажения, проявляющиеся в ухудшении слышимости согласных звуков.

При проведении моделирования был выбран диапазон поиска порогового значения от 50 до 0,5. По результатам моделирования было выбрано значение, лежащее внутри диапазона и равное 1,5. Выбор определялся отсутствием шипения и свиста с одной стороны и субъективным оцениванием слышимости согласных звуков с другой стороны. Также на основании проведенного моделирования было принято решение разделить диапазон слышимых частот на две области и использовать два пороговых значения весового коэффициента. Нижняя область охватывает частоты, лежащие в окрестности частоты первого «всплеска» ($k = 0$), в верхнюю область попадают остальные критические частоты. Граница областей (т. е. значение частоты, разделяющей области) численно равна половине значения частоты второго «всплеска» ($k = 1$). Как следует из (3):

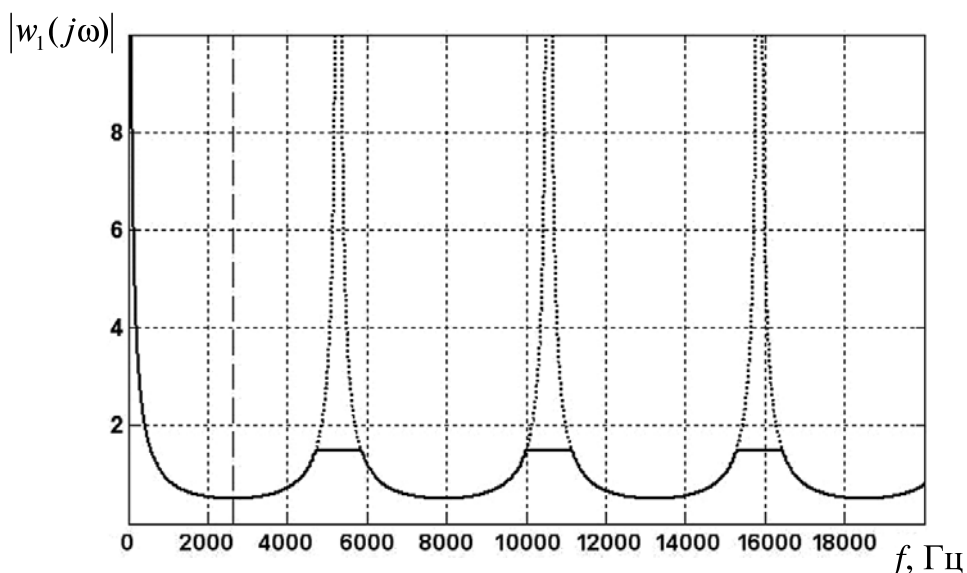


Рис. 3. Значения модуля весового коэффициента до (.....) и после (—) процедуры порогового ограничения

$$f_{\text{гран}} = \frac{c}{d |(\sin \varphi'' - \sin \varphi')|} \cdot 1/2. \quad (4)$$

Пороговое значение весового коэффициента в нижней области должно быть выше, чем в верхней. Выбор значения весового коэффициента в нижней области определялся с одной стороны отсутствием тембральных искажений голоса, а с другой стороны — отсутствием перегрузки звукового сигнала на низких частотах, которая приводила к снижению общего уровня сигнала при его прохождении через тракт. По результатам моделирования было выбрано пороговое значение, равное 100.

На рис. 3 представлены графики абсолютных значений весовых коэффициентов до и после процедуры порогового ограничения для углов $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$. Граница областей ($f_{\text{гран}} = 2645$ Гц) показана пунктиром.

По аналогии были проведены модельные эксперименты для произвольных значений углов φ' и φ'' от случая максимально возможного разнесения источников по на-

правлениям ($\varphi' = -90^\circ$, $\varphi'' = 90^\circ$) до случая их близкого расположения ($\varphi' = -5^\circ$, $\varphi'' = 5^\circ$). При этом использовались два постоянных пороговых значения весовых коэффициентов (100 для первой области, 1,5 для второй), изменялась только граница областей в соответствии с (4).

Результаты моделирования, полученные с использованием двух пороговых значений коэффициентов при точной настройке на углы φ' и φ'' , показывают следующее:

мешающий речевой сигнал подавляется полностью;

вносимых искажений (шипения, свиста) не наблюдается;

слышимость согласных звуков для полезного сигнала не ухудшается;

полезный речевой сигнал иногда претерпевает тембральные искажения, не вызывающие раздражения у слушателя; в большинстве случаев тембральные искажения незаметны.

Экспертные испытания

Для окончательного установления опти-

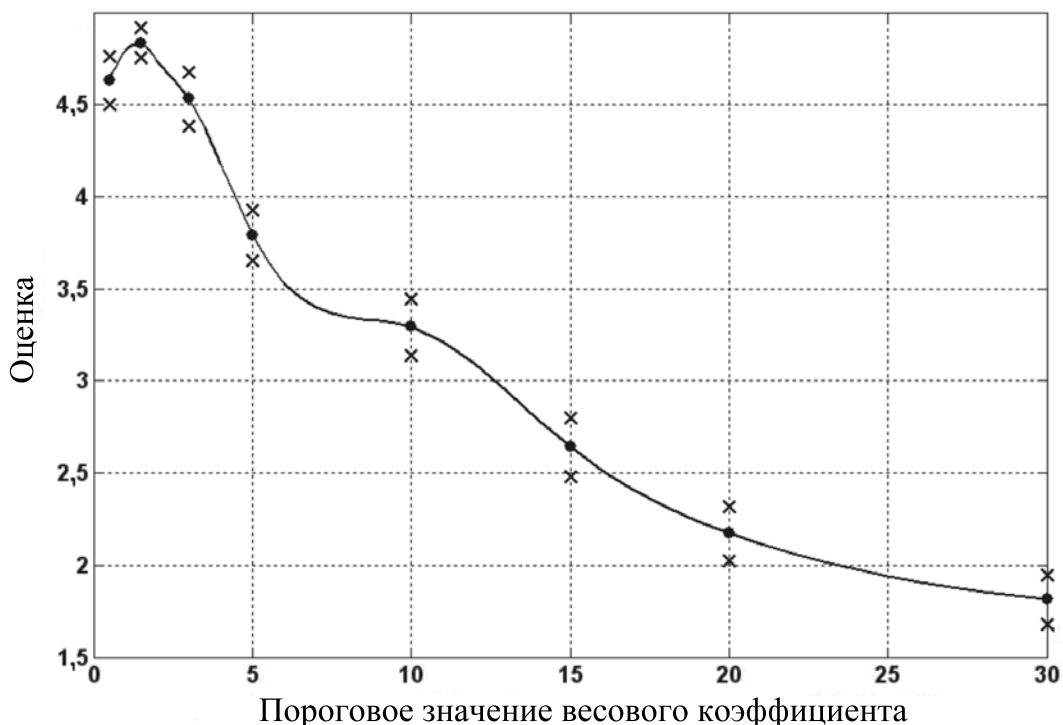


Рис. 4. Зависимость оценки искажений от порогового значения весового коэффициента в мелком масштабе

мального значения порога весового коэффициента в верхней области частот были проведены экспертные статистические испытания. В качестве исходного материала использовалась аудиозапись сигналов, полученных с выхода двух имитированных микрофонов. Эти сигналы представляли собой смесь двух голосов дикторов, находившихся под разными точно известными углами к решетке $\varphi' = -40^\circ$, $\varphi'' = 40^\circ$ и говоривших одновременно (см. рис. 1). В ходе каждого испытания задавалось пороговое значение весовых коэффициентов, и производился их расчет с учетом порогового ограничения. Далее осуществлялась обработка (разделение) сигналов путем взвешенного суммирования их спектров, и формировался результирующий сигнал, готовый для субъективной оценки. Затем задавалось новое пороговое значение, и формировался новый результирующий сигнал.

Полученная совокупность сигналов прослушивалась по очереди через головные телефоны и субъективно оценивалась. Для участия в экспертных испытаниях были привлечены преподаватели и студенты Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения (СПбГИКиТ) в общем количестве 92 человека. Перед каждым из экспертов была поставлена задача интегральной оценки заметности двух видов искажений: артефактов, проявляющихся при высоком значении порога в виде шипения, свиста и дребезга, и ухудшения качества самого сигнала, проявляющегося при низком значении порога в виде тембральных искажений и ухудшения слышимости согласных звуков. Для оценки заметности искажений, в соответствии с рекомендацией ITU-R BS.1284-1 [11], использовалась 5-балльная шкала со следующими градациями: 5 — искажения незаметны; 4 — искажения заметны, но не мешают; 3 — искажения немного мешают; 2 — искажения мешают и раздражают; 1 — искажения сильно мешают. Оценки, выставленные экспертами, далее подвергались статистической обработке.

Усредненные результаты субъективных оценок искажений полезного сигнала и доверительные интервалы представлены в виде графика на рис. 4.

Как следует из рисунка, оптимальное пороговое значение, являющееся компромиссом между искажениями первого и второго вида, равно 1,5. Таким образом, для минимизации искажений, возникающих в сигнале при обработке микрофонной решеткой, рекомендуется выбирать пороговое значение весовых коэффициентов, равное 1,5.

В статье рассмотрен метод, позволяющий адаптировать способы построения фазированной антенной решетки, используемой в радио- и гидролокации для узкополосного сигнала, применительно к широкополосному речевому сигналу. Показано, что прямая адаптация метода приводит к искажению речевого сигнала.

Для минимизации искажений проведены модельные эксперименты, по результатам которых даны рекомендации по выбору весовых коэффициентов в частотной области, используемых для получения взвешенного сигнала на выходе микрофонной решетки.

Эти рекомендации сводятся к определению границы между двумя областями слышимых частот, которым соответствуют два пороговых значения весовых коэффициентов, и к установлению пороговых значений весовых коэффициентов. Эти пороговые значения должны одновременно удовлетворять требованиям отсутствия шипения и свиста в сигнале, отсутствия ухудшения слышимости согласных звуков и отсутствия тембральных искажений.

В результате экспертных статистических испытаний получена зависимость оценки искажений сигнала от порогового значения весового коэффициента, позволяющая установить оптимальное пороговое значение, равное 1,5. При данном значении минимально заметны как вносимые искажения (шипение, свист), так и искажения самого сигнала (изменение тембра голоса, приглушение согласных звуков).



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столбов М.Б. Применение микрофонных решеток для дистанционного сбора речевой информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 661–675.
2. Brandstein M., Ward D. (Eds.). *Microphone Arrays*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2001.
3. Huang Y. *Microphone array signal processing* // Springer topics in signal processing. 2008.
4. Tashev I. *Sound Capture and Processing: Practical Approaches*. Wiley, 2009.
5. Benesty J., Chen J. *Study and Design of Differential Microphone Arrays* // Springer topics in signal processing. 2013.
6. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. *Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию*. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
7. Бененсон Л.С., Журавлев В.А., Попов С.В., Постнов Г.А. *Антенные решетки*. М.: Сов. радио, 1966. 368 с.
8. Журавлев А.К., Лукошкин А.П., Поддубный С.С. *Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках: Монография*. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 240 с.
9. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. *Введение в теорию адаптивных антенн*. М.: Наука, 1991. 200 с.
10. Кривошейкин А.В., Перелыгин С.В. *Микрофонная решетка для реализации направленной акустической антенны* // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 221–225.
11. Rec. ITU-R BS.1284-1. *General methods for the subjective assessment of sound quality*. 1997–2003.

REFERENCES

1. Stolbov M.B. *Primeneniye mikrofonnykh reshetok dlya distantsionnogo sbora rechevoy informatsii* [Application of microphone arrays for distant speech capture]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2015, Vol. 15, No. 4, Pp. 661–675. (rus)
2. Brandstein M., Ward D. (Eds.). *Microphone Arrays*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2001.
3. Huang Y. *Microphone array signal processing*. Springer topics in signal processing, 2008.
4. Tashev I. *Sound Capture and Processing: Practical Approaches*. Wiley, 2009.
5. Benesty J., Chen J. *Study and Design of Differential Microphone Arrays*. Springer topics in signal processing, 2013.
6. Monzingo R.A., Miller T.U. *Adaptivnyye antennoye reshetki: Vvedeniye v teoriyu* [Adaptive arrays: Introduction to the Theory]. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1986, 448 p. (rus)
7. Benenson L.S., Zhuravlev V.A., Popov S.V., Postnov G.A. *Antennnyye reshetki* [Antenna arrays]. Moscow: Sov. Radio Publ., 1966, 368 p. (rus)
8. Zhuravlev A.K., Lukoshkin A.P., Poddubnyy S.S. *Obrabotka signalov v adaptivnykh antennoykh reshetkakh: Monografiya* [Signal processing in adaptive array antenna: Monograph]. Leningrad: LGU Publ., 1983, 240 p. (rus)
9. Pistolkors A.A., Litvinov O.S. *Vvedeniye v teoriyu adaptivnykh anten* [Introduction to adaptive antenna]. Moscow: Nauka Publ., 1991, 200 p. (rus)
10. Krivosheykin A.V., Perelygin S.V. *Mikrofonnaya reshetka dlya realizatsii napravlennoy akusticheskoy anteny* [Microphone array for directional acoustic antenna implementation]. *Izv. vuzov. Priborostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 2015, Vol. 58, No. 3, Pp. 221–225. (rus)
11. Rec. ITU-R BS.1284-1. *General methods for the subjective assessment of sound quality*, 1997–2003.

ПЕРЕЛЫГИН Сергей Васильевич — ассистент кафедры радиотехники и информационных технологий факультета технологий кино и телевидения Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения.

191119, Россия, Санкт-Петербург, ул. Правды, д. 13.

E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

PERELYGIN Sergey V. St. Petersburg State University of Film and Television.

191119, Pravdy Str. 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

НУРМУХАМЕДОВ Леон Хасенович — доцент кафедры радиотехники и информационных технологий факультета технологий кино и телевидения Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, кандидат технических наук.

191119, Россия, Санкт-Петербург, ул. Правды, д. 13.

E-mail: nurmukh36@mail.ru

NURMUKHAMEDOV Leon H. *St. Petersburg State University of Film and Television.*

191119, Pravdy Str. 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: nurmukh36@mail.ru



Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.234.4

УДК 519.6:527

В.А. Ботнев, С.М. Устинов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ТОЧКОЙ И ЛИНИЕЙ В ГЕОДЕЗИИ

V.A. Botnev, S.M. Ustinov

A METHOD FOR FINDING THE DISTANCE BETWEEN A POINT AND A LINE IN GEODESY INTELLECTUAL SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Предложена эффективная методика определения расстояния между траекторией и точкой на поверхности сфероида для решения последующих задач управления. Получены оценки погрешности решения при использовании сферического приближения. Оценен выигрыш во времени при задействовании гномонической проекции с начальным сферическим приближением и без него. Выявлены границы применимости сферического приближения и гномонической проекции в рамках представленной методики. Указаны причины возникновения и метод выявления многоэкстремальности в предложенной задаче. Представлен алгоритм ее решения в этих условиях. Методика демонстрирует высокую точность решения, может быть рекомендована для использования в коммерческих навигационных и геодезических программных продуктах, удовлетворяющих международным стандартам, и распространена на задачи управления, связанные с перехватом цели.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ; ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ; ЛОКСОДРОМИЯ; ОРТОДРОМИЯ; ЗАДАЧИ МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МИНИМИЗАЦИИ.

An efficient method for determining the distance between a trajectory and a point on the surface of a spheroid is proposed to address some ensuing control problems. An error assessment for the spherical approximation is obtained. The time gained through applying the gnomonic projection with the initial spherical approximation and without it is estimated. The limits of applicability of the spherical and the gnomonic projections for the method are shown. Detection of multiple extrema in the proposed problem and the causes of their occurrence are described. The algorithm for the solution of this problem under such conditions is suggested. The method demonstrates high accuracy of the solution and can be recommended for use in commercial navigation and geodetic software products that comply with international standards. The technique extends to control problems associated with target intercepting.

MODELING METHODS; GEODESIC PROBLEMS; LOXODROME; ORTHODROME; MULTI-EXTREMAL OPTIMIZATION PROBLEMS.

Решение прямой и обратной геодезических задач занимает важное место в приложениях геодезии и навигации [10, 13]. Как известно, прямая задача определяет положение точки после смещения под заданным углом и на заданное расстояние из некоторой начальной точки. Обратная за-

дача ставит своей целью найти расстояние между заданными точками и азимут из первой точки на вторую.

Существуют два наиболее часто используемых типа линий на поверхности Земли: ортодрома и локсодрома. В первом случае линия (ортодрома) является кратчайшим

путем из одной точки в другую по поверхности Земли. Во втором случае в силу ряда практических потребностей и исторических причин (особенно в задачах навигации) линией между точками является линия постоянного азимута (α), что отвечает траектории с постоянным курсом (локсодрома). Решение этих задач не является тривиальным и часто сводится к вычислению эллиптических интегралов и обратных им функций различными способами, нередко в условиях потери точности [1–3].

Прямая и обратная задачи в свою очередь, как фрагменты, многократно используются для решения целого круга прикладных задач. Одна из них — нахождение минимального расстояния (в рамках выбранной геометрии) между точкой и некой траекторией, а также определение точки на траектории, где реализуется это расстояние. Такая постановка встречается и в геодезии, и в навигации, когда нужно определить кратчайшее расстояние от линии движения до некоторой точки. Задача может варьироваться в зависимости от того, что представляет собой линия и каким способом измеряется расстояние. Возможны следующие четыре варианта:

- 1) траектория — ортодрома, расстояние измеряется по ортодроме;
- 2) траектория — локсодрома, расстояние измеряется по ортодроме;
- 3) траектория — ортодрома, расстояние измеряется по локсодроме;
- 4) траектория — локсодрома, расстояние измеряется по локсодроме.

Наиболее часто на практике встречается первый вариант. Здесь он и будет рассмотрен.

Постановка задачи

Рассматривается точка P_0 с широтой φ_0 и долготой λ_0 и траектория (ортодрома), образуемая точкой P_1 с широтой φ_1 , долготой λ_1 и азимутом α в этой точке. Необходимо найти широту φ_2 и долготу λ_2 точки P_2 , которая лежит на той же траектории, и в которой реализуется ближайший к точке P_1 локальный минимум расстояния до точки P_0 (рис. 1).

Условие нахождения *ближайшего* минимума вызвано несферичностью Земли. На сфере ортодрома является замкнутой линией, и минимум только один. Исключения составляют вырожденные варианты, когда P_0 и траектория соотносятся как полюс и экватор. В случае же эллипсоида вращения ортодрома уже не будет замкнутой. Поэтому иногда можно наблюдать несколько конкурирующих между собой локальных минимумов. При этом с практической точки зрения интересным для геодезических задач и для задач навигации чаще всего является именно ближайший минимум, который нужно искать на траектории в двух направлениях от точки P_1 или в одном строго заданном, в зависимости от прикладной задачи.

Решение задачи на сфере

Как известно, модели Земли мало отличаются от шара, поэтому естественной является попытка решить эту задачу для сферы с последующим переходом на эллипсоид вращения. Разбор задачи на сфере полезен не только с методической точки зрения, но и с точки зрения использования в дальнейшем для оптимизации расчетов.

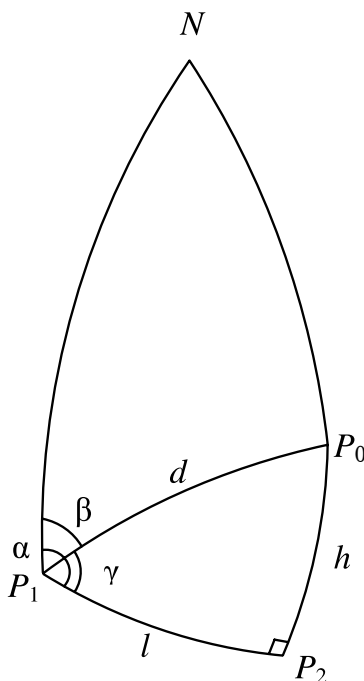


Рис. 1. Решение задачи на сфере

Кроме того, сравнивая решения на сфере и эллипсоиде, можно определить границы применимости сферического приближения. Ортодрома на сфере — это дуга большого круга, т. е. гарантированно замкнутая линия в отличие от ее аналога на эллипсоиде. Как уже отмечалось, на сфере данная задача имеет одно решение при условии, что все точки ортодромы не равноудалены от P_0 (в этом случае получается бесконечное множество решений).

Наглядно такую ситуацию можно продемонстрировать, поместив точку P_0 на один из полюсов, а ортодрому поместив на экваторе. Иными словами, указанная равноудаленность достигается только тогда, когда радиус-вектор точки P_0 , проведенный из центра сферы, перпендикулярен плоскости дуги большого круга.

В отличие от эллипсоида вращения задача на сфере значительно проще и может быть решена аналитически средствами сферической тригонометрии. В этом случае радиус сферы традиционно принимается равным единице, и все расстояния измеряются в радианах.

Рассмотрим рис. 1, где точкой N отмечен северный полюс. Решая обратную геодезическую задачу на сфере для точек P_0 и P_1 , находим угол β и расстояние d . Так как в точке P_2 достигается минимум, то угол при этой вершине треугольника $P_0P_1P_2$ будет прямой. Угол γ при вершине P_1 равен $\alpha - \beta$. Таким образом, задача сводится к решению прямоугольного сферического треугольника по гипотенузе и углу.

В контексте поставленной задачи нужно локализовать точку P_2 и найти сторону h . Воспользовавшись мнемоническим правилом Непера [4, 5] для решения прямоугольных треугольников, получим формулу $\tan(l) = \tan(d) * \cos(\gamma)$.

Для однозначного определения положения точки P_2 , будем рассматривать l не как длину, а как величину смещения вдоль ортодромы, которое может принимать значения от $-\pi$ до π , где положительным смещениям соответствуют смещения из точки P_1 с азимутом α . Перепишем предыдущую формулу в виде:

$$\tan(l) = (\sin(d) * \cos(\gamma)) / \cos(d). \quad (1)$$

Теперь комбинация знаков числителя и знаменателя позволяет однозначно определить l (например, на языке С с помощью стандартной функции atan2). Положение точки P_2 можно найти путем решения прямой геодезической задачи (смещаясь из точки P_1 на расстояние $|l|$ с азимутом α , если $l > 0$, и в противоположном направлении, если $l < 0$).

Для нахождения расстояния h от точки P_0 до ортодромы можно воспользоваться теоремой Пифагора для сферических треугольников:

$$\cos(d) = \cos(l) * \cos(h). \quad (2)$$

Теперь несложно получить минимальное расстояние h , диапазон изменения которого от 0 до π , что полностью согласуется с областью значений функции $\arccos$.

Если точка P_1 перестает быть фиксированной, то при движении по ортодроме будут изменяться величины d и l . Тогда в соответствии с (2) расстояние d в зависимости от l будет определяться по формуле:

$$d(l) = \arccos(\cos(d_{\min}) * \cos(l)), \quad (3)$$

где $d_{\min} = h$.

Отсюда сразу же следует, что при $d_{\min}$ не равном $\pi / 2$, расстояние между соседними экстремумами равно π , период этой функции равен 2π , а значения функции в минимуме и максимуме $d_{\min}$ и $\pi - d_{\min}$ соответственно.

Введение функции $d(l)$ целесообразно по следующей причине. При переходе от сферы к эллипсоиду предыдущие формулы (1) и (2) перестают выполняться, в то время как характер поведения функции $d(l)$ для обеих моделей оказывается близким.

Основной алгоритм решения задачи на эллипсоиде

В случае эллипсоида вращения функция $d(l)$ перестает быть периодической. В большинстве случаев она ведет себя приблизительно также, но есть примеры серьезных искажений. Это можно увидеть на представленных ниже рис. 2–5, где за модель земного эллипсоида принята WGS84 [7, 11], а за единицу длины — большая полуось.

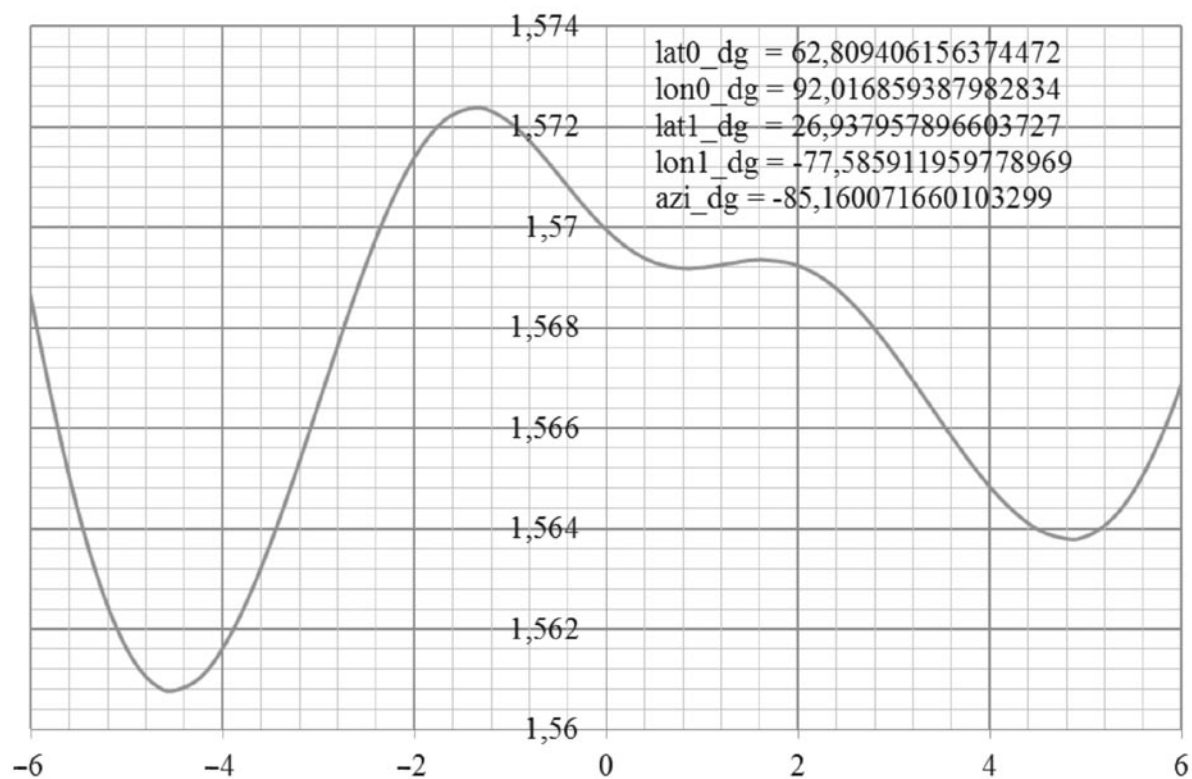


Рис. 2. Близкие экстремумы (вариант 1)

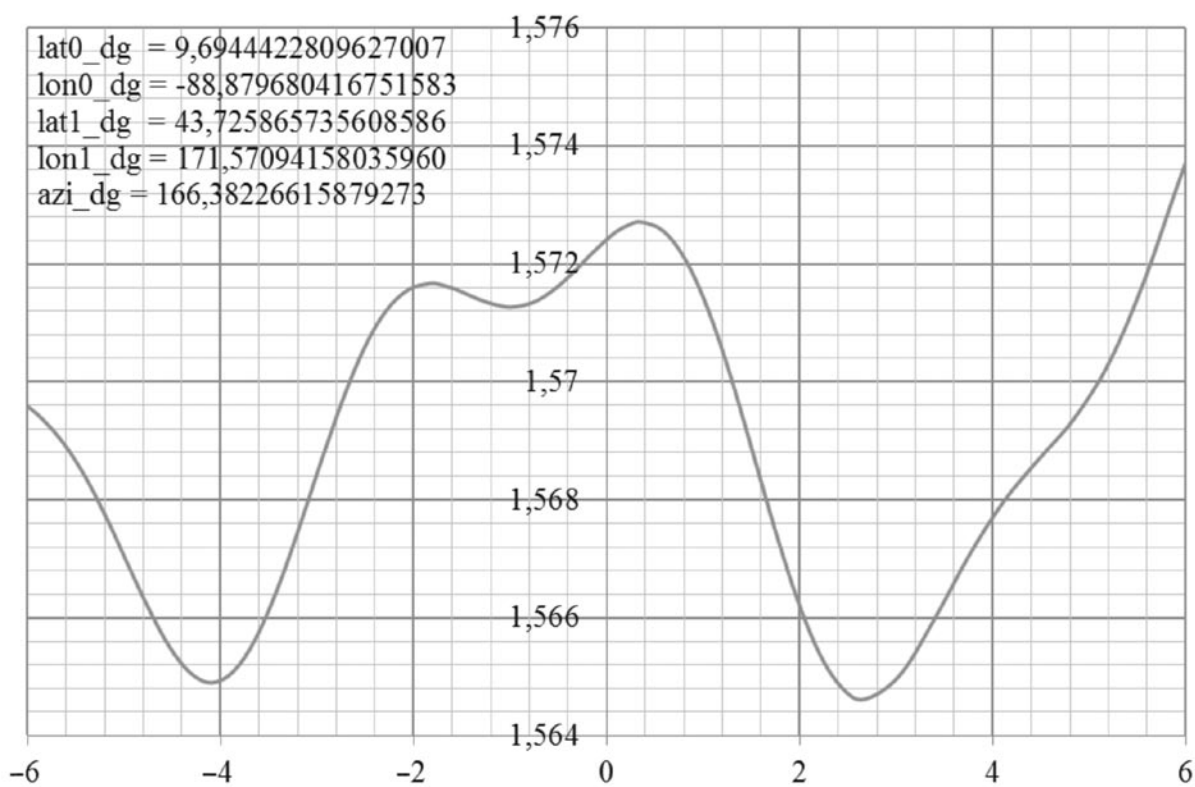


Рис. 3. Близкие экстремумы (вариант 2)

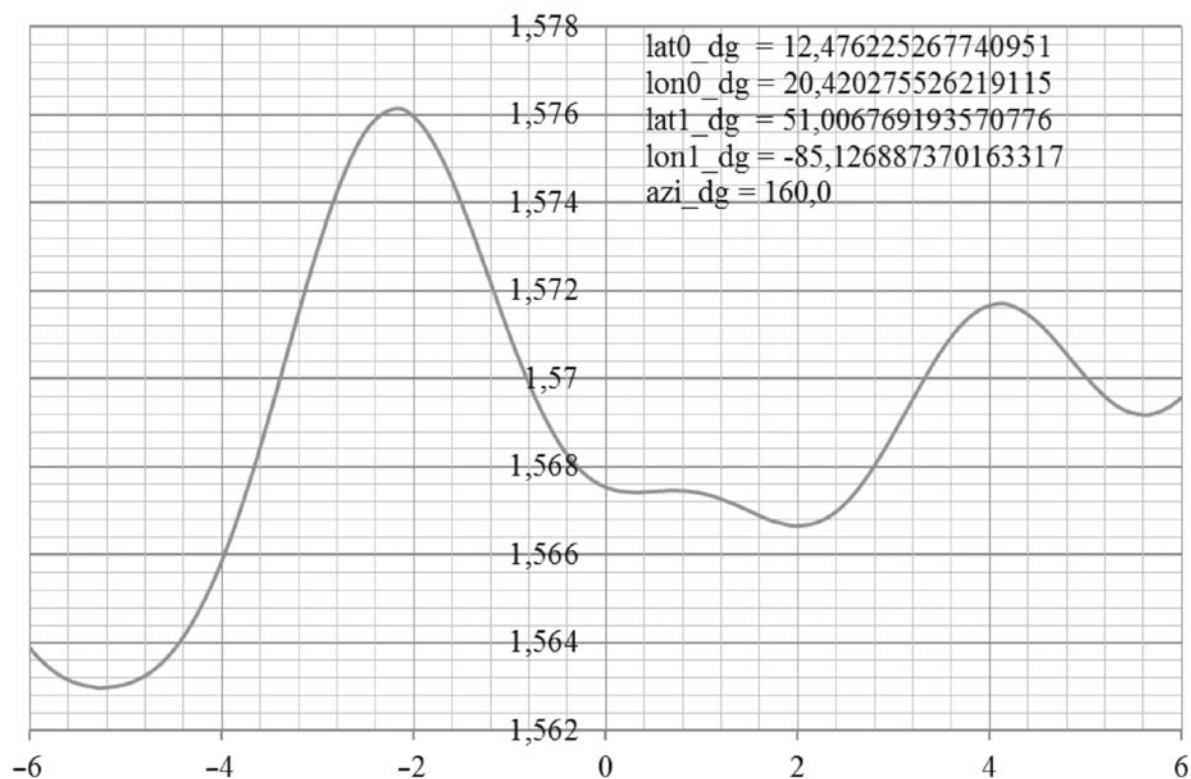


Рис. 4. Близкие экстремумы (вариант 3)

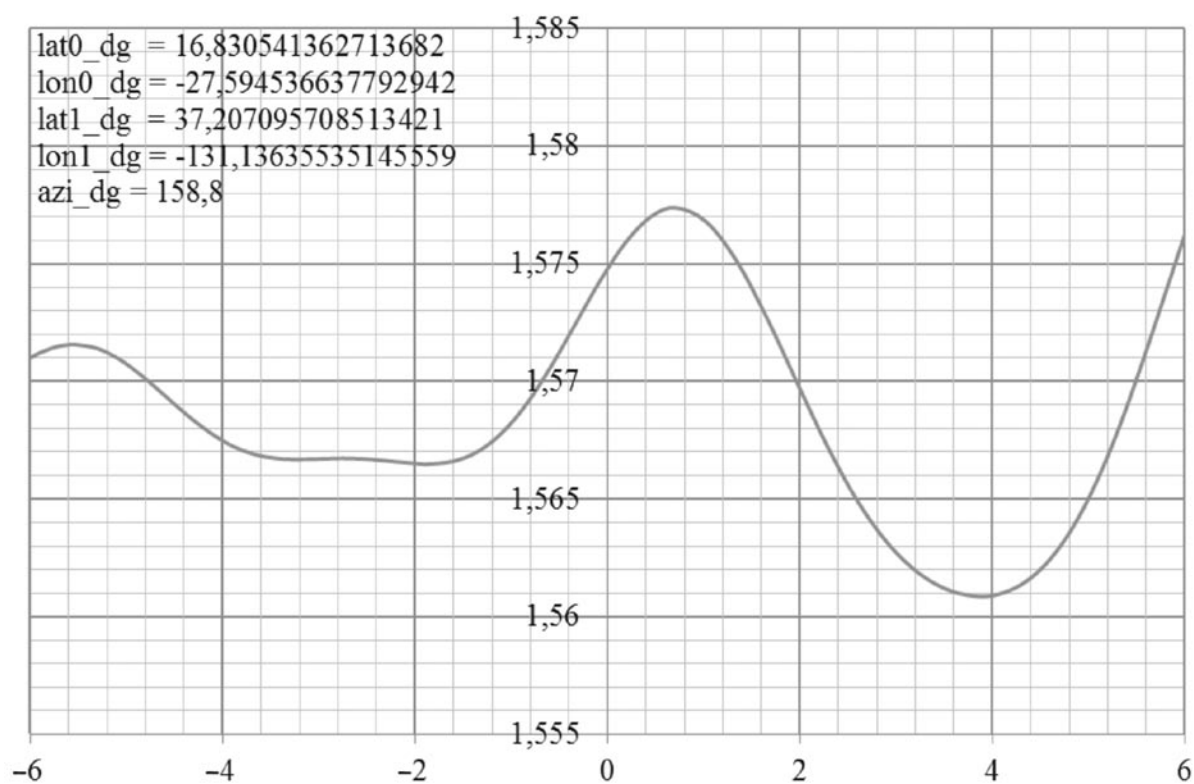


Рис. 5. Близкие экстремумы (вариант 4)

На всех рисунках приведены значения параметров, для которых строились графики: $lat0_dg$, $lon0_dg$, $lat1_dg$, $lon1_dg$ означают значение широты и долготы в градусах для точек P_0 и P_1 , а azi_dg — значение азимута α в градусах.

В ситуациях такого рода картина регулярной смены максимумов и минимумов искажается, и получаются экстремумы, близкие друг к другу, с расстоянием между ними значительно меньшим π (за единицу берется значение большой полуоси a). Тогда определение ближайшей области гарантированного минимума без знания местоположения соседних экстремумов становится нетривиальной задачей.

Все подобные случаи являются аналогом ситуации на сфере, когда функция $d(l)$ является почти постоянной, и эллиптичность формы Земли начинает играть значительную роль в появлении дополнительных экстремумов.

Эта точка зрения подтверждается данными, полученными в ходе численного эксперимента, в котором случайным образом генерировались географические координаты двух точек P_0 и P_1 (широты и долготы подчинялись равномерному распределению в диапазонах от -90 до 90° и от -180 до 180° соответственно). Для каждой такой пары азимут α менялся от 0 до 180° с шагом в $0,05^\circ$, и на интервале смещений l от -2π до 2π с шагом в 10 км вычислялись значения функции $d(l)$. При этом экстремумы определялись по нарушению монотонности этих значений, и считалось, что экстремуму отвечает точка нарушения монотонности (для которой оба соседних значения $d(l)$ одновременно больше — минимум или меньше — максимум). Если обнаруживалось, что расстояние между соседними экстремумами было меньше трех, то осуществлялся переход на более детальный анализ.

Этот анализ заключался в том, что шаг азимута менялся на $0,0001^\circ$, и он изменялся в две стороны от текущего значения до тех пор, пока условие сближения экстремумов меньше чем на три не пропадало. Для каждого такого значения азимута определялся интервал близких экстремумов, т. е. диапа-

зон значений параметра l , на котором расстояние между соседними экстремумами меньше трех. Далее этот диапазон расширялся с двух сторон на величину $3/2$. Для всех таких обнаруженных диапазонов рассчитывалось минимальное и максимальное значение $d(l)$ и угла γ .

Было сгенерировано сто тысяч пар точек, из которых только для 2717 нашелся такой диапазон азимутов, для которого соседние экстремумы сближались меньше чем на три. Выяснилось, что для всех выявленных случаев для модели Земли WGS84 $d_{\min} = 1,519$, $d_{\max} = 1,622$ (т. е. разница между $d_{\max}$ и $d_{\min}$ составляет около 650 км), а угол варьировался от $86,91$ до $93,09^\circ$. То есть расстояние и угол на всем протяжении таких интервалов мало отличаются от $\pi/2$, как это наблюдается на сфере при мало изменяющейся $d(l)$. Эти значения могут применяться для проверки на наличие двух близких экстремумов в окрестности некоторой точки ортодромы.

С учетом возможности выявлять и обрабатывать случаи близких минимумов алгоритм решения выглядит следующим образом.

Шаг 1. Начиная от точки P_1 , вдоль рассматриваемой ортодромы (в одну или в обе стороны в зависимости от постановки задачи) откладываются отрезки длиной в $3/2$ (расстояние до ближайшего минимума может оказаться больше π , по крайней мере, в некоторых случаях больше $4,35$).

Шаг 2. Протестировать крайние точки отрезков на наличие в их окрестности близких экстремумов. Отрезок может содержать несколько близких экстремумов, если для обоих его концов одновременно выполняются условия:

$$1,519 < d(l) < 1,622 \text{ и } 86,91^\circ < \gamma < 93,09^\circ.$$

В этом случае переходим к шагу 3. Во всех остальных ситуациях непрерывная функция $d(l)$ имеет не более одного экстремума на двух смежных отрезках. Тогда продвигаемся по ортодроме до тех пор, пока для последовательных трех точек значение $d(l)$ в центральной из них не будет меньше, чем на краях. Переходим к шагу 4.

Шаг 3. Если отрезок подозревается на



наличие двух и более экстремумов (в этом случае в силу непрерывности $d(l)$ хотя бы один из них гарантированно будет минимумом), нужно действовать исходя из требований конкретной задачи. При расстояниях между соседними точками порядка 10 000 км (это отвечает шагу 3/2) изменения функции $d(l)$ на 650 км при решении некоторых задач могут считаться незначительными, и в качестве минимума можно взять первую попавшуюся точку из окрестности близких экстремумов.

Если же выдвигаются более строгие требования по точности, то нужно действовать исходя из них. Если минимум не обнаружен, то продолжаем движение по ортодроме с возвратом к шагу 2. В противном случае — конец работы алгоритма.

Шаг 4. Одним из универсальных методов минимизации находится минимум в пределах ближайшего к точке P_1 отрезка. Если рассматриваются два направления и в обоих из них обнаруживаются равноудаленные от P_1 отрезки двойной длины, содержащие минимум, то нужно решать задачу минимизации на обоих и считать в качестве ответа самый ближайший к точке P_1 минимум. Конец работы алгоритма.

Стратегия поведения на шаге 3 может быть различной. Например, при повышенных требованиях к точности можно применить следующий подход:

1. При обнаружении ситуации, когда расстояние между экстремумами меньше трех, уменьшать длину откладываемых отрезков в два раза и применять к концам этих отрезков критерий для расстояния 3/2 (а не три, как было раньше на шаге 2).

2. Повторять деление пополам до тех пор, пока изменение функции на анализируемых интервалах не станет малым в рамках заданной точности, либо экстремумы уже не будут являться близкими в рамках текущего критерия.

3. При выявлении интервала унимодальности найти минимум, если он есть.

Представленный выше прием может быть распространен на другие задачи, если существует набор параметров, по которым можно судить о наличии ситуации с близкими минимумами.

Использование расчетов на сфере

Описанный выше алгоритм носит общий характер и позволяет решить задачу в общей постановке. Часто объем вычислений можно сократить, используя предварительно расчеты на сфере. Они выполняются значительно быстрее, чем на эллипсоиде, т. к. в этом случае существует сравнительно простое аналитическое решение. Полученное таким образом начальное приближение может использоваться в эффективном приеме, описанном в следующем разделе. Определим условия, когда это возможно.

Одна из проблем применимости сферического подхода заключается в том, что точка минимума должна лежать на заданной ортодроме поверхности эллипсоида, в то время как сферическое решение задачи в общем случае будет вне этой линии. Дело в том, что дуга большого круга на сфере, проходящая через точку с теми же географическими координатами φ_1 и λ_1 и азимутом α в этой точке, не будет в общем случае проходить через те же географические координаты, что и аналогичная ортодрома на эллипсоиде. Поэтому нужно каким-то образом проецировать решения, полученные на сфере, на поверхность эллипсоида. В частности, возможно использование сферы усредненного радиуса $R = 2a/3 + b/3$ [6], где b — малая полуось, и рассмотрение на этой сфере точек с такими же значениями географических координат и азимутов, как и на эллипсоиде. После получения на сфере значения l переходим на эллипсоид и применяем это значение для нахождения положения точки P_2 , решая прямую геодезическую задачу.

В табл. 1 представлены данные, отражающие зависимость максимальной ошибки по параметру l при решении задачи на эллипсоиде WGS84, используя сферическое приближение.

Исходные данные для решения задачи строились следующим образом. Широта точки P_1 формировалась как равномерно распределенная случайная величина в диапазоне от -90 до 90° , а долгота всегда была равна 0° . Таким образом, было учтено все многообразие положений точки P_1

Таблица 1

Ошибка сферического приближения по параметрам l и h

d , км	Δl , км	Δh , км
10	0,056	0,056
20	0,11	0,11
50	0,28	0,28
100	0,56	0,56
200	1,1	1,1
500	2,8	2,8
1000	5,6	5,6
2000	11	11
5000	26	26
7000	42	33
8000	63	35
9000	130	37
9500	260	37
9900	1400	38

на поверхности эллипсоида вращения, где вариация долготы не позволяет получить большее разнообразие ситуаций. Положение точки P_2 определялось путем решения прямой геодезической задачи с расстоянием d и азимутом, который формировался как равномерно распределенная случайная величина в диапазоне от -180 до 180° . Количество испытаний составляло 30 млн для каждого значения в таблице.

Как видно из таблицы, отношение $\Delta l / d$ не превышает 0,006 для значений d меньше 5 000 км, а далее это отношение начинает значительно расти, достигая значения 0,14 для $d = 9\,900$ км. Что же касается значения расстояния h , то отношение $\Delta h / d$ не превышает значения 0,006 при всех значениях d из таблицы. Для больших значений d использование сферического приближения становится нерациональным, т. к. различие между точным и сферическим решением может быть весьма значительным. Это хорошо иллюстрируют ситуации, упоминаемые выше, с близкими или очень далекими друг от друга экстремумами.

Таким образом, по значению d можно до выполнения каких-либо расчетов оценить сверху абсолютные погрешности для величин l и h , вызванные заменой эллипсоида на сферу.

Оптимизация с использованием специфики ортодромы

Решение задачи нахождения расстояния между прямой и точкой на плоскости еще проще, чем на сфере. Если бы существовало некое непрерывное сохраняющее углы отображение поверхности эллипсоида вращения на плоскость, при котором ортодромы переходили бы в прямые линии, то это позволило бы решить задачу путем перехода на плоскость, а потом обратно.

В картографии отображения земной поверхности на плоскость называют *проекцией* [12]. К сожалению, нельзя построить такую проекцию для всей поверхности не только эллипсоида, но и даже сферы.

Можно ослабить требования к проекции и допустить ее применимость только для части поверхности. В случае сферы примером может служить гномоническая проекция, которая переводит на плоскость только половину сферы. На эллипсоиде ситуация несколько сложнее, и аналоги сферической гномонической проекции способны лишь отображать ортодрому в «почти» прямую линию, с увеличением искажений при удалении от центра проекции. Один из самых удачных вариантов такой проекции предложен в статье [1].

Пусть точка A — центр проекции, а точка B — произвольная точка (обе находятся на поверхности земного эллипсоида). Тогда точка B проецируется в точку на плоскости с координатами $x = \rho * \sin(\alpha_1)$, $y = \rho * \cos(\alpha_1)$, $\rho = m_{12} / M_{12}$, где α_1 — азимут из точки A в точку B , m_{12} — приведенная длина геодезической, а M_{12} — коэффициент сближения геодезических (geodesic scale). Заметим, что проекция не определена для неположительных значений M_{12} .

В работе [1] предложена схема алгоритма нахождения минимума расстояния от точки до ортодромы с помощью этой проекции. Метод заключается в следующем:

1. Задаем на заданной ортодроме точку Q_0 — начальное приближение к точке минимума P_2 . При этом Q_0 не совпадает с P_1 .

2. Переводим точки P_0 , P_1 и Q_j на плоскость в точки A_0 , A_1 и B_j , соответственно, выбрав в качестве центра проекции точку Q_j . При этом точки A_1 и B_j окажутся на прямой, отражающей ортодрому, а точка A_0 может оказаться как вне этой прямой, так и на ней.

3. Определяем точку прямой, ближайшую к A_0 . Переводим на эллипсоид найденное решение и получаем точку Q_{j+1} , которая является очередным приближением к ответу.

4. Вычисляем расстояние между Q_j и Q_{j+1} . Если расстояние оказывается меньше максимально допустимого отклонения от истинного минимума, то прерываем расчет, принимая за ответ точку Q_{j+1} . Если нет, то переходим к шагу 2, используя Q_{j+1} вместо Q_j .

В статье [1] утверждается, что сходимость будет квадратичной, что свидетельствует об эффективности предложенного подхода.

К недостатку данного метода можно отнести то, что он не работает, когда одно из расстояний от Q_j до точек P_0 и P_1 будет порядка $\pi / 2$ и больше. В этом случае происходит выход за границы области применимости гномонической проекции.

В добавление к сказанному выше, выбор Q_0 в рамках метода неоднозначен, что влияет на результат. По этим причи-

нам следует уточнить рассмотренный алгоритм. Необходимо выделить интервал унимодальности, где гарантированно будет только один экстремум, и он является минимумом. В процессе итераций нужно следить за тем, чтобы не выйти за границы интервала. Кроме того, правильный выбор Q_0 позволяет ускорить исполнение алгоритма, и этот выбор можно делать на основании сферического приближения, описанного в предыдущем разделе. Эффективность такого подхода следует из результатов табл. 2.

Эта таблица аналогична табл. 1 с точно такой же интерпретацией строк и таким же набором тестовых данных. Данные каждой клетки таблицы являются результатами усреднения нескольких испытаний.

В столбце A отражено нормированное время исполнения алгоритма нахождения минимума на эллипсоиде WGS84 методом гномонической проекции с начальным сферическим приближением.

За единицу времени в табл. 2 принято среднее время решения упомянутым методом для значения $d = 10$ км.

В столбце B приведено время, затрачиваемое тем же методом, но с начальным приближением, соответствующим $|l_0| = d / 2$, где знак l_0 выбирается в соответствии с направлением уменьшения расстояния до точки P_0 при движении вдоль заданной в задаче ортодромы от точки P_1 .

В столбце C приведено время работы популярного алгоритма минимизации Брента [8, 9]. Данные табл. 2 не только оправдывают применение начального сферического приближения для метода гномонической проекции, но и свидетельствуют о значительном выигрыше этого метода по сравнению с алгоритмом Брента.

Сформулируем окончательный вариант алгоритма:

1. По расстоянию между точками P_0 и P_1 определить, возможно ли использовать сферическое приближение или нет.

2. Если да, то решить задачу на сфере (это возможно сделать аналитически с помощью сферической тригонометрии).

3. Если по итогам шага 1 удастся локализовать ближайший минимум, то принимая

Таблица 2

Сравнение времени решения задачи разными способами

d , км	A	B	C
10	1	1,03	3,76
20	1,01	1,14	3,63
50	1,01	1,38	3,53
100	1,02	1,43	3,47
200	1,07	1,52	3,47
500	1,35	1,65	3,44
1000	1,51	1,67	3,32
2000	1,58	1,70	3,21
5000	1,71	2,14	3,23
7000	1,75	2,29	3,62
8000	1,77	2,35	3,55
9000	1,79	2,42	3,48
9500	1,81	2,52	3,41
9900	1,90	2,57	3,40

решение сферической задачи за нулевое приближение, применить метод проекции и завершить на этом работу. В противном случае переход к шагу 4.

4. Построить отрезки длиной в $3/2$ и выяснить, на каких из них ожидаются минимумы. Если оба конца отрезка проходят тест на наличие близких минимумов, и нет более близкого отрезка с минимумом, где такое поведение не ожидается, то возникшая ситуация обрабатывается в зависимости от специфики конкретной задачи. Если близких минимумов нет, то переход к шагу 5.

5. Выбрать ближайший к P_i отрезок унимодальности с гарантированным минимумом (если есть конкурирующий по близости отрезок, то его также учесть). Для каждого из полученных отрезков найти минимум методом проекций и завершить алгоритм. Если метод проекций завершился неудачей (нет сходимости или выход за пределы проекции), то переход к шагу 6.

6. Применить стандартный метод ми-

нимизации. Если был один отрезок, то полученный на нем минимум считать за ответ, если два, то выбрать ближайший к точке P_i .

Предложена методика решения задачи поиска кратчайшего расстояния между точкой и геодезической линией (ортодромой). Методику можно распространить на задачи управления, связанные с перехватом целей.

Методика позволяет выявлять случаи аномально близких экстремумов. Даны рекомендации по решению задачи в таких ситуациях. Используемый подход может быть рекомендован и в более общих случаях поиска минимума в многоэкстремальных задачах.

Определена область применения метода гномонической проекции для нахождения ближайшей точки на ортодроме и предложена методика, расширяющая диапазон эффективного решения задачи.

Получена оценка точности сферического приближения для решаемой задачи.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Karney C.F.F.** Algorithms for geodesics // *J. Geodesy*. 2013. Vol. 87(1). Pp. 43–55.
2. **Karney C.F.F.** Geodesics on an ellipsoid of revolution // Technical report. SRI International, Febr. 2011.
3. **Ботнев В.А., Устинов С.М.** Методы решения прямой и обратной геодезических задач с высокой точностью // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 3(198). С. 49–58.
4. **Todhunter I.** Spherical trigonometry. London: Macmillan and Co, 1886.
5. **Волинский Б.А.** Сферическая тригонометрия. Москва: Наука, 1977. 136 с.
6. **McCaw G.T.** Long Lines on the Earth // *Empire Survey Review*. 1932. No. 1(6). Pp. 259–263.
7. **Deakin R.E., Hunter M.N.** Geometric Geodesy. Part A // *Lecture Notes*. School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, Australia, 2008. 140 p.
8. **Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P.** Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 2007. 1235 p.
9. **Устинов С.М., Зимницкий В.А.** Вычислительная математика. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 336 с.
10. **Helmert F.R.** Die mathematischen und physikalischen Theorem der höheren Geodäsie // *Die mathematischen Theorem*. Leipzig, 1880. Vol. 1.
11. **Rapp R.H.** Geometric geodesy. Part II // Technical report. Ohio State University, 1993. 177 p.
12. **Snyder J.P.** Map projection—a working manual // Professional Paper 1395. U.S. Geological Survey, 1987. 383 p.
13. **Морозов В.П.** Курс сфероидической геодезии. Москва: Недра, 1979. 296 с.

REFERENCES

1. **Karney C.F.F.** Algorithms for geodesics, *J. Geodesy*, 2013, Vol. 87(1), Pp. 43–55
2. **Karney C.F.F.** Geodesics on an ellipsoid of revolution, *Technical report*, SRI International, February 2011
3. **Botnev V.A., Ustinov S.M.** Metody resheniya pryamoy i obratnoy geodezicheskikh zadach s vysokoy tochnostyu [Methods for direct and inverse geodesic problems solving with high precision]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]. St. Petersburg, 2014, No. 3(198), Pp. 49–58. (rus)
4. **Todhunter I.** *Spherical trigonometry*. London: Macmillan and Co, 1886.
5. **Volynskiy B.A.** *Sfericheskaya trigonometriya* [Spherical trigonometry], Moscow: Nauka Publ., 1977, 136 p. (rus)
6. **McCaw G.T.** Long Lines on the Earth. *Empire Survey Review*, 1932, No. 1(6), Pp. 259–263.
7. **Deakin R.E., Hunter M.N.** Geometric Geodesy. Part A. *Lecture Notes*. School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, Australia, 2008, 140 p.
8. **Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P.** *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 2007, 1235 p.
9. **Ustinov S.M., Zimnitskiy V.A.** *Vychislitel'naya matematika* [Computational mathematics], St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2009, 336 p. (rus)
10. **Helmert F.R.** Die mathematischen und physikalischen Theorem der höheren Geodäsie. *Die mathematischen Theorem*. Leipzig, 1880, Vol. 1.
11. **Rapp R.H.** Geometric geodesy, Part II. *Technical report*, Ohio State University, 1993, 177 p.
12. **Snyder J.P.** Map projection – a working manual. *Professional Paper 1395*, U.S., Geological Survey, 1987, 383 p.
13. **Morozov V.P.** *Kurs sferoidicheskoy geodezii* [Course spheroidal geodesy], Moscow: Nedra Publ., 1979, 296 p. (rus)

БОТНЕВ Виктор Александрович – старший инженер-программист ЗАО «Транзас». Россия, Санкт-Петербург, Малый пр. В.О., д. 54, корп. 4, лит. В.
E-mail: Victor.Botnev@transas.com

BOTNEV Victor A. ZAO «Transas». 199178, Maly Ave. 54-4, Vasilievsky Island, St. Petersburg, Russia.
E-mail: Victor.Botnev@transas.com

УСТИНОВ Сергей Михайлович — профессор кафедры информационных и управляющих систем
Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета
Петра Великого, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: usm50@yandex.ru

USTINOV Sergey M. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: usm50@yandex.ru

DOI: 10.5862/JCSTCS.234.5

УДК 004.932

В.Г. Шубников, С.Ю. Беляев

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ СТОПЫ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

V.G. Shubnikov, S.Yu. Belyaev

3D RECONSTRUCTION OF THE SPATIAL FORM OF THE HUMAN FOOT BASED ON THREE DIGITAL IMAGES

Реконструкция формы человеческой ступни необходима для многих задач современной обувной промышленности: это и индивидуальный пошив изделий, и задачи оценки удобства ношения. В недалеком будущем «виртуальные примерочные» в виде интернет-сайтов или порталов будут оснащены различными методами оценки удобства ношения продаваемых изделий. В том числе возможны методы, в которых будет реконструироваться 3D модель стопы, основываясь только на трех цифровых фотографиях. Понятно, что к таким фотографиям предъявляются некоторые требования. В этой статье рассмотрены специальные условия фотографирования, следуя которым описанный метод восстанавливает 3D форму стопы. Цифровые изображения могут быть получены в домашних/офисных условиях без специального студийного оборудования.

ИЗМЕРЕНИЕ СТОПЫ ЧЕЛОВЕКА; ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ; РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ; ПОДБОР ОБУВНЫХ ИЗДЕЛИЙ; ОЦЕНКА УДОБСТВА НОШЕНИЯ ОБУВНЫХ ИЗДЕЛИЙ; 3D РЕКОНСТРУКЦИЯ.

3D reconstruction of human body parts is one of the most prominent directions of research in the high-end technology industry. There are a lot of new tasks in the modern footwear industry, such as mass market-oriented individual shoe manufacturing and footwear fit factor estimation. In the near future “virtual fitting rooms” in the form of websites will use different approaches to footwear comfort estimation. Some of them will use 3D reconstruction of the human foot, based only on 3 digital images. In this article we described the special conditions required for obtaining such input images in typical home/office conditions without professional photo equipment. We described a 3D method for foot reconstruction.

HUMAN FOOT MEASUREMENTS; IMAGE PROCESSING; PATTERN RECOGNITION; SHOE FITTING; SHOEWARE COMFORT ESTIMATION; 3D RECONSTRUCTION.

Развитие обувной промышленности и лавинообразный рост онлайн продаж обувных изделий предполагают развитие новых методов идентификации анатомических особенностей стопы человека, новых методов оценки удобства ношения обувных изделий и других алгоритмических методов (основанных на математических по-

строениях), позволяющих с одной стороны упростить процесс производства, а с другой – увеличить процент точности выбора изделия в интернет-магазине при осуществлении покупки.

Если попытаться представить, как будет функционировать интернет-магазин обуви будущего, то это будет разновидность базы

данных, хранящей в облачном пространстве некие индивидуальные анатомические особенности человека. Каждый клиент, зарегистрированный в системе, будет предоставлять персональную информацию (достаточную только лишь для идентификации) и мерки своей стопы. Используя эти данные производитель сможет изготовить обувное изделие, основываясь на предоставленной информации.

Сейчас индивидуальный пошив обуви связан с хранением физических слепков (колодок) стопы клиентов, а в будущем эта информация будет представлена в цифровом виде, соответственно, стоимость хранения и обработки данных будет значительно уменьшена, что приведет к возможности массового индивидуального пошива. Также интернет-магазины будущего смогут предложить выборку из всего ассортимента изделий (доступных к покупке), которая идеально подходит для конкретного клиента.

Вопрос в том, что же должна хранить такая база данных? Если мы будем использовать приемы «старой школы» для описания особенностей стопы, то можно предложить хранить длину стопы, обхват стопы и другие простые измерения. У этого классического подхода есть очевидный (и критический) недостаток: клиент должен обладать навыками настоящего обувного мастера, чтобы с помощью гибкого метра сделать точные измерения стопы. Длину стопы измерить довольно просто, и это можно сделать весьма точно. А вот измерить обхват гибким метром намного сложнее, т. к. обыкновенный человек может придумать десятки разных способов оборачивания своей стопы гибким метром. Очевидно, что разброс результатов таких измерений будет существенным (вплоть до сантиметра), и считать такие данные достоверными попросту невозможно. Ошибка в 2 мм считается максимально допустимой для задач индивидуального пошива. Получить измерения с такой точностью вряд ли возможно для неподготовленного пользователя (непрофессионала в обувной индустрии).

Если бы мы могли получить 2D форму стопы клиента, то задача изготовления/оценки удобства ношения решалась бы со-

всем иначе, и это открывало бы возможность применения системы для миллионов пользователей.

Вероятно, что в будущем базы данных производителей обуви/интернет-магазинов будут хранить персональную идентификационную информацию и 3D форму стопы. Предоставление доступа к этой информации будет важно для производителей обуви по индивидуальному пошиву (им не нужно будет хранить в шкафах пластиковые модели стоп клиентов; они смогут использовать 3D модели стопы человека для производства обувного изделия на фабрике) и для интернет-магазинов. Они смогут хранить 3D модели изделий в базе данных своих изделий и предлагать клиенту только те модели, которые виртуально хорошо подходят пользователю. При этом пользователю не нужно будет тратить время на бесконечное перелистывание каталога обувных изделий, которые ему (или ей) точно не подойдут. Интернет-магазин сможет существенно сократить свои транспортные расходы, связанные со случаями отказа при получении заказа (клиент примерил заказанное изделие, и оно ему не подошло). Это может буквально взорвать рынок онлайн продаж обувных изделий. Безусловно, такой сценарий вероятен только при возможности осуществить моделирование 3D формы стопы с высокой точностью и при наличии надежных методов определения удобства ношения.

Существует несколько подходов к получению 3D формы стопы человека. В наиболее простом случае можно использовать 3D сканер или глубинный сканер. Современные 3D сканеры — очень дорогие устройства, поэтому не могут использоваться в «каждом доме». Следовательно, это решение не годится для массового рынка.

Современные глубинные инфракрасные камеры предлагают более интересную возможность для решения данной задачи. В работе [1] показано, как глубинная камера может использоваться в процессе 3D реконструкции в домашних условиях. В [2] сделана попытка получения точных 3D моделей на основании цифровых изображений.

Проблема качественной (точной) ре-



конструкции 3D форм человеческого тела не нова: например, в [3] сделана попытка использования видеопотока для восстановления формы и движений. В работе [4] показан один из способов, которым можно извлечь из фотографии стопы человека контур стопы в виде ломаной линии. В [5] показан метод определения линейных (не пространственных) размеров стопы человека.

Хотелось бы предложить такой способ обработки исходных данных, в результате которого можно получить трехмерную модель стопы человека с достаточно высокой точностью. Для целей индивидуального пошива обуви или виртуальной примерки точность моделирования в 0,5 мм является достаточной. По сути, требуется получить трехмерную модель стопы с минимальной ошибкой. Это цель данной работы.

Постановка задачи

Клиент предоставляет три цифровые фотографии стопы, сделанные обыкновенным смартфоном в домашних условиях с соблюдением правил фотографирования: носок должен быть черным, сплошным. Для всех фотографий нужно использовать одну и ту же, свою, правую ногу. Необходимо закатать брюки и использовать чистый лист бумаги формата A4. Требование формата A4 не столь критично, алгоритм может использоваться и для формата бумаги Us Letter, и других, близких размеров. Два изображения должны быть получены, располагая камеру мобильного устройства на высоте обычного офисного/домашне-

го стола. На этих изображениях должны быть внутренняя и внешняя части стопы. На третьей фотографии должна быть видна боковая проекция стопы.

Чтобы упростить обработку изображений и улучшить точность результата мы используем листы бумаги в качестве «усилителей» контраста. Используя высокий контраст интенсивности цветов между темными пикселями носка и светлыми пикселями бумаги, мы можем распознать форму стопы на изображении с очень высокой степенью точности. На выходе требуется реконструировать трехмерную форму сфотографированной стопы так, чтобы трехмерная модель отличалась от реальной трехмерной формы не более чем на 1,5 мм.

Реконструкция формы стопы

Весь процесс может быть описан следующей последовательностью действий:

1. Извлечь контур бумаги и стопы из исходных изображений.
2. Детектировать контуры стопы из первых двух цифровых изображений и выполнить коррекцию перспективных искажений. Затем смешать оба откорректированных контура в единый контур: этот контур стопы будет в горизонтальной плоскости.
3. Используя базу данных 3D моделей, выбрать наиболее удачно подходящую модель и изменить ее, применяя контуры стопы в перпендикулярных плоскостях.

Стадия I. Извлечение контура стопы из трех исходных изображений

Обработка изображения делится на две



Рис. 1. Исходные цифровые изображения для 3D реконструкции стопы человека, снятые современным смартфоном

стадии: на первой стадии детектируется контур листа бумаги, на второй извлекается контур стопы, при этом используется полученная информация о расположении листа бумаги. Если первая стадия распознавания завершилась неуспешно, то весь процесс прерывается и возвращается код ошибки.

Процесс распознавания контура листа бумаги состоит из четырех шагов:

Шаг 1. Исходное изображение масштабируется в сторону уменьшения пиксельного разрешения. Главная цель – уменьшение площади обработки изображения (в пикселях) и увеличение скорости всего процесса в целом. Важный побочный эффект заключается в том, что после уменьшения разрешения пропадают мелкие незначительные детали, имеющие шумовое происхождение. Безусловно, уменьшение разрешения не приводит к избавлению от всех шумов. Их количество становится меньше. До какой степени можно уменьшать исходное изображение? Конкретная цифра получается в ходе простого эксперимента, причем условием выбора минимального размера является возможность распознать части изображения «человеческим глазом».

Шаг 2. Построение карты «однородности» для светлых оттенков на исходном изображении. Здесь необходимо пояснить, что является «однородным», и какие оттенки считаются «светлыми». Однородность пикселя (точней окрестности пикселя) может быть описана формулой:

$$u(x, y) = \begin{cases} i(x, y) > b_i \\ \sum_{k=x-1}^{k=x+1} \sum_{l=y-1}^{l=y+1} |i(x, y) - i(k, l)| < b_c \end{cases}, \quad (1)$$

где $u(x, y)$ – однородность в пикселе с координатами (x, y) ; $i(x, y)$ – интенсивность пикселя в точке (x, y) , считается, что вхо-

дящее изображение преобразовано в формат градации серого (цветовая информация не важна, важна интенсивность); индексы k, l отражают отношение соседства к текущему пикселю, на практике мы можем использовать только четыре соседних пикселя (вместо восьми) ради ускорения производительности вычислений без существенной потери в качестве; b_i – значение специального барьера, чтобы отличить пиксель «светлого» оттенка (поиск «светлых» пикселей поможет нам найти зоны с высокой вероятностью обнаружения в них листа бумаги), конкретное значение b_i определяется после экспериментальной обработки статистики тестовых входящих изображений; b_c – барьерное значение, с помощью которого мы можем утверждать, что текущий пиксель (x, y) выглядит очень похожим (или нет) на соседние пиксели (схожесть вычисляется как модуль разностей между интенсивностями пикселей).

Шаг 3. Основная идея – обнаружить в изображении крупные по площади области однородности. Термин «однородность» используется здесь как признак пикселей с более или менее одинаковой интенсивностью. Чтобы выделить такие области сначала выделяются зоны связности пикселей – множество пикселей, в котором для каждого элемента (пикселя) есть другой, расположенный по соседству (имеется в виду 8-направленное соседство). Для этой цели можно использовать быстрый алгоритм [6], базирующийся на горизонтальном и вертикальном сканировании изображения. В каждой обнаруженной компоненте связности удаляются «дыры» небольшого размера с помощью простейшей дилатации [7]. Простейшая пиксельная «дыра» удаляется если справедливо:

$$i'(x, y) = i(x, y - 1) : \begin{cases} i(x, y) = 0 \\ i(x, y - 1) = i(x, y - k), k = +1, +2, -1, -2 \end{cases}$$

$$i'(x, y) = i(x - 1, y) : \begin{cases} i(x, y) = 0 \\ i(x - 1, y) = i(x - k, y), k = +1, +2, -1, -2 \end{cases}$$

«Дыры» более крупных размеров детектируются с помощью алгоритма заливки области, который начинает работать

с пикселя, отнесенного к «фону», до тех пор, пока количество пройденных пикселей менее 120. Число 120 подобрано в ре-

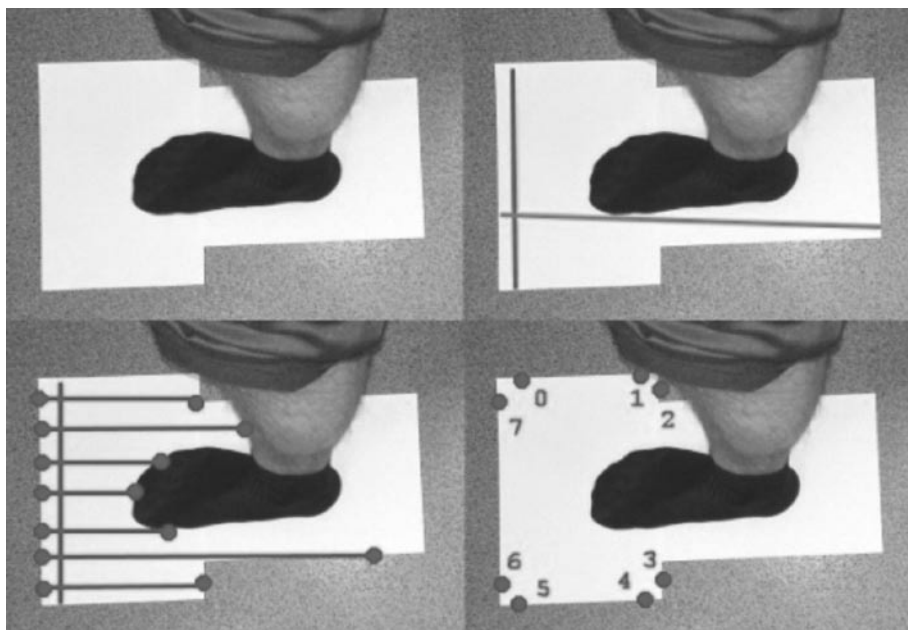


Рис. 2. Детали процесса обнаружения листа бумаги

зультате экспериментов.

Шаг 4. Среди всех «крупных» областей однородности выбирается область, содержащая лист бумаги, и отбрасываются все области, которые чем-либо похожи на лист бумаги, например прямоугольные куски паркета светлого оттенка. Для этого в области однородности устанавливаются наиболее длинная горизонтальная и вертикальная линии. На практике используется целая серия линий, наклон которых близок к «горизонтальной» или «вертикальной». В этих условиях алгоритм может обрабатывать входные изображения, на которых лист бумаги не идеально выровнен по горизонтали и вертикали, а лишь приблизительно.

После обнаружения самых длинных «горизонтальной» и «вертикальной» линий оценивается их отношение. Если эта величина не попадает в заранее подсчитанный диапазон, то зона однородности не может содержать лист бумаги и выбрасывается из дальнейшего рассмотрения. Этот простой прием позволяет быстро отбросить зоны связности, которые не являются листом бумаги, но, тем не менее, выглядят «светло» и «однородно».

Левый (или правый) край бумаги детектируется, используя наиболее длинную

вертикальную линию: из нее выпускаются горизонтальные лучи влево (или вправо) до точки пересечения с границей области. Этот процесс показан на рис. 2 в нижнем левом углу. Если точки пересечения (обозначены красными точками) лежат на одной линии, то граница края бумаги найдена. Если нет, то текущая зона связности отбрасывается, и алгоритм рассматривает следующую. Обнаружив левую границу листа бумаги (с правой границей действия те же самые, симметрично предыдущим), мы можем разметить положения точек 0, 1, 2, ..., 7, показанные в правом нижнем углу на рис. 2. Координаты этих точек помогут нам построить отрезки P_0P_1 , P_2P_3 , P_4P_5 , P_6P_7 . Точки пересечения прямых, построенных на этих отрезках, дадут координаты углов листа бумаги.

Процесс детектирования стопы состоит из пяти шагов:

Шаг 1. Масштабирование исходного изображения в сторону уменьшения пиксельного разрешения.

Шаг 2. Выполнение построения карты однородности с «темными» пикселями. Здесь используется тот же критерий для определения «однородности», что и в процессе детектирования листа бумаги (фор-

мула (1)) с небольшим отличием: интенсивность пикселя должна быть меньше (не больше) чем заранее подобранная константа.

Шаг 3. Обрезание областей, расположенных вне листов бумаги.

Шаг 4. Обнаружение крупных областей среди всех компонент связности. На этой стадии мы отбрасываем слишком маленькие или наоборот, слишком большие области.

Шаг 5. Извлечение контура ломаной линии на основе зоны связности и сравнение этой линии с «эталонной». Для сравнения используется набор ориентированных градиентов, извлекаемых из исходного контура. Для начала исходный контур изменяется таким образом, чтобы получить контур с фиксированным количеством точек и одинаковым расстоянием между точками контура. Это позволит сравнивать контуры по упрощенной схеме: в данном случае направления градиентов фрагментов контуров будут очень похожи (если сами контуры похожи). Плюс к этому контуры нормализуются в единичный размер, используя охватывающий прямоугольник контура. Оценка схожести между обнаруженным контуром и «эталонным» контуром вычисляется по формуле:

$$err = \frac{\sum_{i=0}^N |A[i] - B[i]|}{N},$$

где N — число точек в обоих сравниваемых контурах A и B ; $A[i]$ — значение угла наклона в i -й точке контура A ; $B[i]$ — значение угла наклона в i -й точке контура B .

Если результирующая ошибка меньше заранее подобранной константы, то считается что у контуров имеется сходство. Мы используем этот очень простой метод оценки сходства контуров ради повышения производительности вычислений. В более обобщенном случае можно использовать метод «оценки площади локальных треугольников», описанный в [8].

Верхняя часть рис. 3 показывает стадии обнаружения листа бумаги, нижняя часть рисунка показывает процесс извлечения контура стопы. В левой верхней части показано много областей однородности «светлых» оттенков, которые должны быть отброшены алгоритмом распознавания. На центральной картинке в верхней части рисунка разными цветами показаны различные зоны связности. Изображение с видом стопы сбоку обрабатывается так же, как и две фотографии, сделанные из положения «вид сверху».

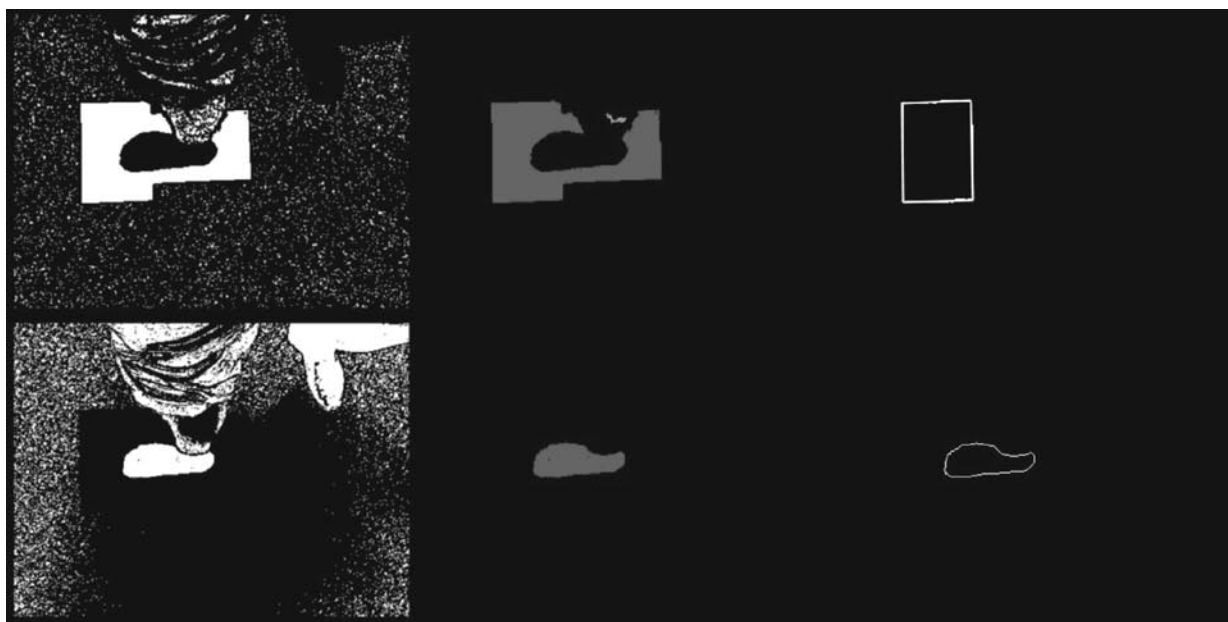


Рис. 3. Стадии распознавания контура листа бумаги и контура стопы

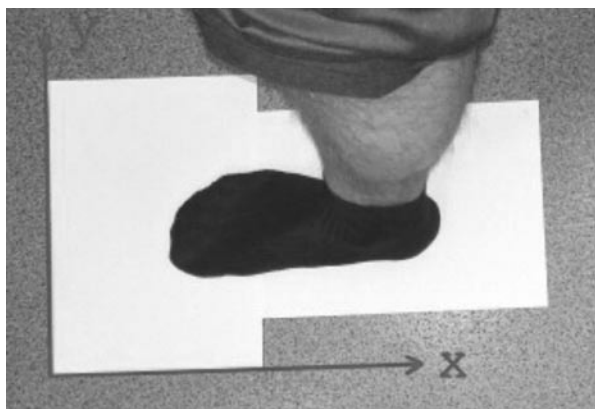


Рис. 4. Система координат (x, y) на модельной плоскости

Стадия II. Перспективная коррекция и реконструкция контура стопы

Цель перспективной коррекции – удаление искажений контуров, которые появляются в результате центральной проекции (в момент фотографирования). Коррекция выполняется с помощью матрицы гомографии H , которая устанавливает соответствие между модельной плоскостью камеры и изображением:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где (x, y) и (u, v) – координаты точки на модельной плоскости и плоскости изображения соответственно; s – коэффициент масштабирования.

Будем считать плоскость пола модельной плоскостью. Один из углов листа бумаги используется в качестве центра системы координат, как показано на рис. 4.

Матрица гомографии для каждого изображения вычисляется четырьмя углами листа бумаги, используя алгоритм, описанный в [9]. Обозначим через m_{ij} компоненты матрицы, обратной к матрице гомографии. Тогда координаты модельной плоскости могут быть вычислены через координаты на изображении с помощью выражения (2):

$$\begin{aligned} x &= \frac{m_{11} * u + m_{12} * v + m_{13}}{m_{31} * u + m_{32} * v + m_{33}}; \\ y &= \frac{m_{21} * u + m_{22} * v + m_{23}}{m_{31} * u + m_{32} * v + m_{33}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Формулы (3) применяются к точкам контуров, полученных из первых двух изображений. Результат показан на рис. 5.

Контур S_1 и S_2 не полностью совпадают друг с другом, как показано на рисунке. Причина заключается в том, что эти контуры располагаются на некотором возвышении над полом и сфотографированы под углом. Рассмотрим положение стопы и камеры, показанное на рис. 6.

Пусть камера располагается в точке T и P – произвольная точка на контуре стопы. На модельной плоскости точка P будет отображаться в точку Q (слева на рисунке). Так как нам нужно найти ортогональную проекцию контура стопы на плоскость пола, точка Q должна быть заменена точкой P' .

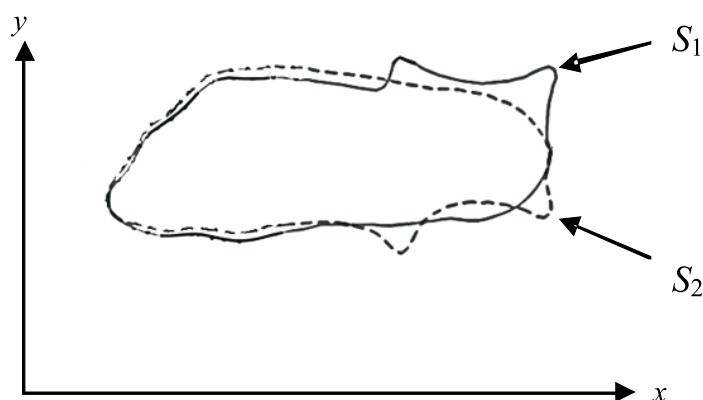


Рис. 5. Трансформация исходных контуров в систему координат (x, y) . S_1 соответствует первому изображению, S_2 – второму

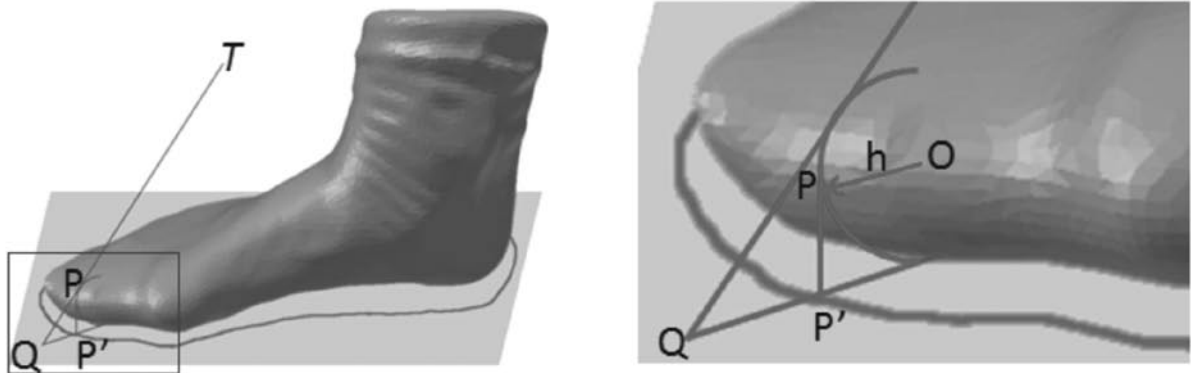


Рис. 6. Коррекция стопы по высоте:

T – точка фотографирования; P – точка контура стопы; Q – ее проекция на модельную плоскость; P' – точка на финальном контуре; окружность O с радиусом h примерно показывает границу стопы в окрестности точки P

Можно примерно приблизить поверхность в окрестности точки P сферой радиуса h , причем h – высота точки P над модельной плоскостью (на рисунке справа). Нетрудно доказать, что координаты (x'_p, y'_p) точки P могут быть выражены исходя из координат (x_q, y_q) точки Q следующими формулами:

$$x'_p = x_q - (x_q - x_t) * h / z_t \pm \left(\frac{h * \sqrt{z_t^2 + (x_q - x_t)^2}}{z_t} - h \right) * \text{sgn}(x_q - x_t); \quad (4)$$

$$y'_p = y_q - (y_q - y_t) * h / z_t \pm \left(\frac{h * \sqrt{z_t^2 + (y_q - y_t)^2}}{z_t} - h \right) * \text{sgn}(y_q - y_t). \quad (5)$$

Здесь (x_t, y_t, z_t) – координаты точки T , и знак третьего выражения зависит от положения скорректированной точки контура по отношению к камере и стопе: если скорректированная точка расположена между камерой и стопой, то знак положительный, иначе – отрицательный.

Положение точки камеры $T = (x_t, y_t, z_t)$ может быть вычислено с помощью соотношений, выведенных в работе [9]:

$$T = \lambda A^{-1} H_3; \quad (6)$$

$$\lambda = 1 / \|A^{-1} H_1\|. \quad (7)$$

Здесь A – матрица калибровки камеры и $H = [H_1, H_2, H_3]$ – матрица гомографии.

Для вычисления компонент матрицы A воспользуемся приближением:

$$A = \begin{pmatrix} f & 0 & u \\ 0 & f & v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где f – фокальная длина и (u, v) – координаты главной точки, равные половине ширины и высоты входного изображения соответственно.

В этом случае отношение (6) преобразуется:

$$x_t = \lambda * \left(\frac{h_{13}}{f} - \frac{h_{33} * u}{f} \right); \quad (9)$$

$$y_t = \lambda * \left(\frac{h_{23}}{f} - \frac{h_{33} * v}{f} \right);$$

$$z_t = \lambda * h_{33}.$$

Фокусное расстояние f записывается в заголовке файла, содержащего фотографию. Подстановка (7) в (9) позволяет вычислить неизвестные координаты камеры.

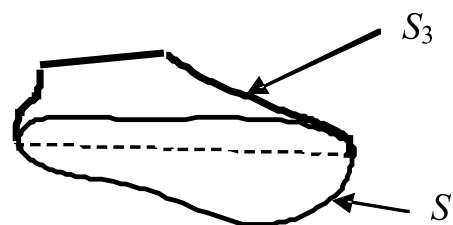


Рис. 7. Горизонтальный и вертикальный контуры стопы

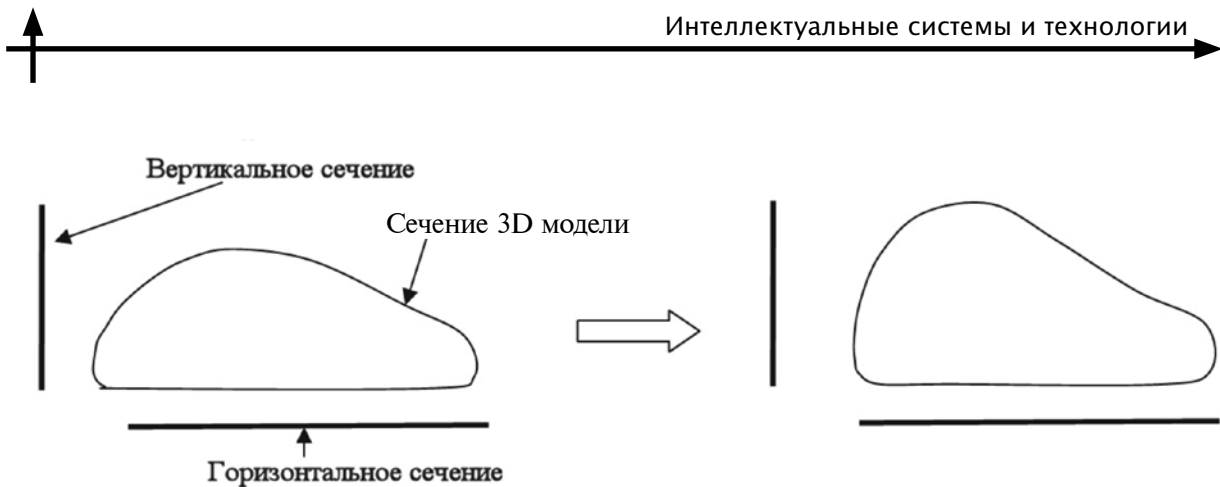


Рис. 8. Масштабирование и сдвиг сечений 3D модели стопы

Для определения высоты в точках контура стопы используем 4-шаговый алгоритм.

Шаг 1. Контур S_1 и S_2 смешиваются в единый контур S . Процедура смешивания основана на осреднении несовпадающих частей контуров.

Шаг 2. Вертикальный контур стопы, извлеченный из третьего исходного изображения, нормализуется длиной контура S . Обозначим этот контур S_3 (рис. 7).

Шаг 3. Используя базу данных различных 3D моделей стопы, можно выбрать модель, наибольшим образом схожую с S и S_3 по ортогональным проекциям.

Шаг 4. Требуемые значения высот для точек контура стопы извлекаются из выбранной 3D модели. В результате всех этих построений вычисляются значения всех величин из правой части формул (4), (5). Формулы (4), (5) используются для коррекции контуров S_1 и S_2 . Скорректированные контуры не имеют различий в общей части, которая становится результирующим контуром S .

Стадия III. Изменение формы стопы в 3D.

Финальная стадия всего процесса — выбор модели стопы из базы данных и ее модификация с помощью 2D контуров стопы, полученная на предыдущем шаге. Важный вопрос: какая 3D модель должна быть выбрана в качестве «базовой» для процесса модификации? Предлагается выбрать из базы данных 3D модель, наиболее похожую на 2D контур, извлеченный из изображения (на этапе распознавания)

в горизонтальной и вертикальной проекциях.

Выбранная модель равномерно масштабируется по всем осям координат, следуя условию: размер модели вдоль оси z (длина стопы) должна быть такой же, как длина горизонтального контура. В масштабированной модели построим продольные и радиальные сечения. Эти сечения масштабируются и сдвигаются до тех пор, пока их горизонтальные и вертикальные проекции не совпадут с соответствующими срезами контуров, обнаруженных на предыдущей стадии II (рис. 8).

Эксперименты и результаты

Для оценки качества измерений стопы были привлечены 63 человека. Стопа каждого из них была отсканирована с помощью сканера 3D Artec MH-T [10] с точностью сканирования 0,1 мм (информация из технического описания сканера), а также были сделаны по три фотографии стопы. Реконструировали 3D модели стоп, которые сравнивались с точными 3D формами, по-

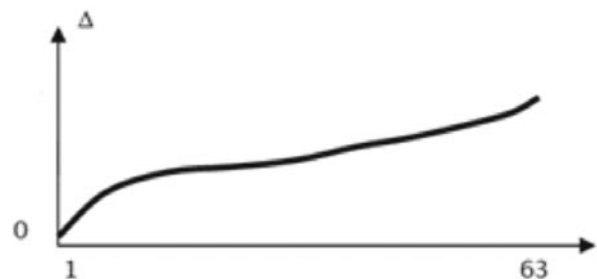


Рис. 9. Значения модуля разности ошибки в 63 экспериментах

лученными 3D сканером. На рис. 9 показан модуль разности Δ (ошибка между ними), отсортированный в порядке увеличения.

Средняя ошибка измерений равна 1,21 мм, а максимальное значение ошибки 2,18 мм.

Алгоритм, описанный в статье, позволяет реконструировать 3D модели стопы только по трем фотографиям. Алгоритм

обеспечивает 1–2 мм точности восстановления 3D формы стопы. Указанной точности вполне достаточно для решения задачи виртуальной примерки в интернет-магазинах и анализа форм стоп людей, проживающих в различных регионах. С некоторыми допущениями данный алгоритм может быть применен для индивидуального пошива обуви, где требуется точность порядка 0,5–1,0 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Isadi S., Kim D., Hilliges O., Molyneaux D., Newcombe R., Kohli P., Shotton J., Hodges S., Freeman D., Davison A., Fitzgibbon A. KineticFusion: Real-time 3D Reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera // Proc. of the 24th Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. 2011. Pp. 559–568.
2. Denkowski M., Mikolajczak P., Chlebiej M. Estimating 3D Surface Depth Based on Depth-of-Field Image Fusion // Internat. Conf. Warsawa, Poland. 2008. Pp. 90–99.
3. Remondino F., Roditakis A. Human Figure Reconstruction and Modeling from Single Image or Monocular Video Sequence // 4th Internat. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling. Bannf, Canada, 2003. Pp. 116–123.
4. Шубников В.Г., Беляев С.Ю. Foot contour detection using digital images // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014.

№ 5(205). С. 63–71.

5. Беляев С.Ю., Шубников В.Г. Определение размеров стопы человека по фотографиям // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 2(193). С. 23–30.
6. Heckbert P. A Seed Fill Algorithm, Graphics Gems. Academic Press, 1990 [электронный ресурс] / URL: <https://github.com/erich666/GraphicsGems/blob/master/gems/SeedFill.c>
7. Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. Prentice Hall, 2007.
8. Alajlan N., Rube I., Kamel M., Freeman G. Shape Retrieval Using Triangle-Area Representation and Dynamic Space Warping // Pattern Recognition. 2007. Vol. 40. Iss. 7. Pp. 1911–1920.
9. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions Pattern Analysis Machine Intellect. 2000. Vol. 22(11). Pp. 1330–1334.

REFERENCES

1. Isadi S., Kim D., Hilliges O., Molyneaux D., Newcombe R., Kohli P., Shotton J., Hodges S., Freeman D., Davison A., Fitzgibbon A. KineticFusion: Real-time 3D Reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera, *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2011, Pp. 559–568.
2. Denkowski M., Mikolajczak P., Chlebiej M. Estimating 3D Surface Depth Based on Depth-of-Field Image Fusion, *International Conference, ICCVG 2008*, Warsawa, Poland, November 10–12, 2008, Pp. 90–99.
3. Remondino F., Roditakis A. Human Figure Reconstruction and Modeling from Single Image or Monocular Video Sequence, *4th International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 6–19 October 2003, Bannf, Canada, Pp. 116–123.
4. Shubnikov V.G., Belyaev S.Yu. Foot contour detection using digital images. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [St. Petersburg State

- Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*], 2014, No. 5(205), Pp. 63–71. (rus)
5. Belyaev S.Yu., Shubnikov V.G. Opredelenie razmerov stopyi cheloveka po fotografiyam [Estimating a human foot size from images]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems], 2014, No. 2(193), Pp. 23–30. (rus)
6. Heckbert P. *A Seed Fill Algorithm*, Graphics Gems. Academic Press, 1990. Available: <https://github.com/erich666/GraphicsGems/blob/master/gems/SeedFill.c>
7. Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2007.
8. Alajlan N., Rube I., Kamel M., Freeman G. Shape Retrieval Using Triangle-Area Representation and Dynamic Space Warping, *Pattern Recognition*, 2007, Vol. 40, Issue 7, Pp. 1911–1920.



9. **Zhang Z.** A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Transactions Pattern Analysis Machine Intellect (PAMI)*, 2000, Vol. 22(11), Pp. 1330–1334.
-

ШУБНИКОВ Владислав Германович — преподаватель кафедры прикладной математики Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: vlad.shubnikov@gmail.com

SHUBNIKOV Vladislav G. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: vlad.shubnikov@gmail.com

БЕЛЯЕВ Сергей Юрьевич — доцент кафедры прикладной математики Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: sergey.belyaev@d-inter.ru

BELYAEV Sergey Yu. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: sergey.belyaev@d-inter.ru

DOI: 10.5862/JCSTCS.234.6

УДК 004.023, 004.383.8.032.26

Е.Н. Бендерская, А.О. Перешейн

ХАОТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИППОКАМПА В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ

E.N. Benderskaya, A.O. Pereshein

CHAOTIC MODELS OF THE HIPPOCAMPUS FOR DYNAMIC PATTERN RECOGNITION

Проведен анализ использования систем с хаотической динамикой для решения задачи распознавания динамических образов. Выполнен анализ существующих хаотических моделей гиппокампа для решения задачи хранения, кодирования и воспроизведения динамических образов. Для детального анализа отобраны: модель хаотической эпизодической памяти Осаны, модель неокортекса-гиппокампа Куремото, модель гиппокампа Тсуды. Первые две модели построены с включением в свой состав хаотической нейронной сети Айхары. Для отобранных моделей выполнено подробное сравнение на основании результатов проведенного моделирования. Показана роль хаотической динамики при учете контекста в задаче распознавания динамических образов. Также определены направления развития рассмотренных моделей.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ; НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА; ХАОТИЧЕСКИЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ; ЭПИЗОДИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ; МОДЕЛИ ГИППОКАМПА; РАСПОЗНАВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ.

The paper carried out an analysis of using systems with chaotic dynamics to solve the problem of dynamic pattern recognition. We reviewed the existing chaotic models of the hippocampus for storage, coding and retrieval of dynamic information. An episodic chaotic associative memory models proposed by Y. Osana, a hippocampus-neocortex model proposed by T. Kuremoto, and Tsuda's hippocampus model are considered in detail. The first two of these models incorporate Aihara's chaotic neural networks. We compared the selected models based on the simulation results. It is shown that chaotic dynamics is necessary in order to take into account the context of dynamic pattern recognition problems. Trends of further modification of the models are also proposed.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE; NONLINEAR DYNAMICS; CHAOTIC NEURAL NETWORKS; EPISODIC MEMORY; MODELS OF THE HIPPOCAMPUS; DYNAMIC PATTERN RECOGNITION.

Различные методы и алгоритмы, относящиеся к научному направлению под названием *искусственный интеллект*, уже давно успешно применяются для решения различных задач в отдельных проблемных областях. Но при этом системы, реализующие такие алгоритмы, не обладают достаточной гибкостью и универсальностью. Возможно и по этой причине (создание множества специфических подходов к решению каждой прикладной задачи), на данный момент еще не решена одна из главных задач

искусственного интеллекта: понимание и моделирование мышления, схожего с человеческим.

На фоне различных отдельных подходов, направленных на решение конкретных прикладных задач, выделяется направление, связанное с универсальным подходом и получившее название *сильный* или *универсальный искусственный интеллект*. Предполагается, что истинно интеллектуальное решение поставленных задач должно обладать универсальностью и основываться на



процессах самоорганизации, т. е. обладать свойствами, помогающими в решении поставленных задач, но не закладываемыми в систему разработчиком непосредственно. Универсальные системы требуют другого, качественного подхода, а не просто интеграции нескольких модулей, решающих разные задачи, в одну систему.

Одним из подходов к построению интеллектуальных систем является использование нелинейных систем с хаотической динамикой [1, 2]. Существование хаоса в системе и ее сложное поведение может обеспечиваться за счет простого нелинейного взаимодействия компонент, что невозможно выявить с помощью принципа декомпозиции. При этом на фоне нерегулярной активности отдельных элементов проявляется синхронизация всей системы, т. е. самоорганизация.

Большое значение при разработке общих интеллектуальных методов обработки информации придается тому, как те же задачи решает человек. Примечательно, что биологические системы в здоровом состоянии обладают предельно неустойчивой динамикой. В связи с этим актуально исследование методов и моделей, построенных по аналогии с биологическими структурами (например, гиппокампом) в рамках рассмотрения нелинейных систем обработки информации.

Цель данной работы – выявление наиболее перспективных моделей обработки информации в нелинейных динамических системах, построенных по принципам работы гиппокампа, для их развития и применения в решении задач распознавания динамических образов. Для выбора моделей, подлежащих детальному анализу и моделированию, необходимо рассмотреть основные свойства хаотических нейронных сетей и соответствующих моделей гиппокампа.

Хаотические нейронные сети и модели гиппокампа

Как известно, живые организмы реагируют не только на внешнюю среду, но и на паттерны, возникающие в результате внутренней активности системы. При предъ-

явлении стимула, в свою очередь, динамика хаотической сети становится более устойчивой, но все равно сохраняется. При этом отклик сети на знакомый ей стимул и на новый отличается. Таким образом, хаос здесь предстает как интерфейс между внешним миром и внутренней динамикой системы. Обобщая особенности данного подхода, можно выделить следующие преимущества нелинейной динамической интерпретации нейронной активности [3]:

- увеличенная емкость памяти системы;
- способность к выделению нового образа от уже запомненного при наличии внешнего стимула и обучение в реальном времени;
- эффективный поиск в пространстве состояний системы (избегание локальных минимумов энергии системы, отвечающих ложным образам);
- объединение процессов запоминания и воспроизведения информации;
- представление памяти в виде динамического процесса, позволяющего связывать несколько образов в единую цепь.

Интерпретируя данные преимущества в рамках построения технических систем обработки информации, использование хаотических нейронных сетей позволяет наделять систему следующими свойствами:

- автономность (ослабление зависимости от априорной информации);
- адаптация (подстройка под решаемую задачу за счет динамики элементов системы, отличие новой информации от уже известной и обучение в реальном времени);
- комплексное восприятие образов (учет временного и пространственного контекста);
- адекватность сложности системы по сравнению со сложностью решаемой задачи (динамически изменяющиеся внешние стимулы требуют динамического отклика системы, раскрывающего их контекст).

Сложность в использовании хаотических систем связана с необходимостью управления собственной динамикой, а также с определением значений различных параметров моделей.

Примерами наиболее известных хаотических нейронных сетей могут служить

модели обонятельной луковицы Фримана (W.J. Freeman) [4] и хаотической нейронной сети Айхары (K. Aihara) [5].

Отметим, что упомянутые модели хаотических систем позволяют добиться улучшения результата и в задачах распознавания и классификации статических образов. Модель Фримана, например, нашла применение в работах [6, 7]. Сеть Айхары, в свою очередь, продемонстрировала большое количество различных динамических режимов [8] и позволила решить задачу распознавания в условиях неопределенности [9]. Данные модели также используются в задачах навигации роботом в условиях неопределенной внешней среды [10, 11].

Гиппокамп — отдел головного мозга, являющийся частью лимбической системы, который задействован в механизмах памяти и пространственной навигации. На сегодняшний день существуют четыре основные теории о роли гиппокампа в формировании памяти, и окончательное примирение между ними еще не достигнуто [12]. Тем не менее очевидным является то, что гиппокамп играет ключевую роль в кодировании, хранении и воспроизведении воспоминаний. Поиск и анализ моделей гиппокампа был выполнен в соответствии со следующими критериями:

- описание модели на уровне ансамблей (слоев) нейронов без учета физико-химических особенностей отдельных элементов;

- наличие в составе системы нейронов с хаотической динамикой и проявление синхронизации при их взаимодействии;

- применимость модели к задаче кодирования и распознавания динамической информации.

В результате анализа существующих моделей для более детального исследования были выделены три модели:

- хаотической эпизодической памяти Осаны (Y. Osana) [13];

- неокортекса-гиппокампа Куремото (T. Kuremoto) [14];

- гиппокампа Тсуды (I. Tsuda) [15].

В следующих разделах рассматривается каждая из моделей, анализируется и сравнивается на основе результатов проведенного моделирования.

Хаотическая модель эпизодической памяти Осаны

Хаотическая модель эпизодической памяти (CEAM — Chaotic Episodic Associative Memory), предложенная японским ученым Осаной (Y. Osana) и коллегами [13], по структуре напоминает двунаправленную ассоциативную память, но с добавлением хаотических нейронов Айхары [5], которые отвечают за хранение и воспроизведение контекстной информации.

Структура модели Осаны приведена на рис. 1.

Выходы нейронов слоя Y выражаются формулой:

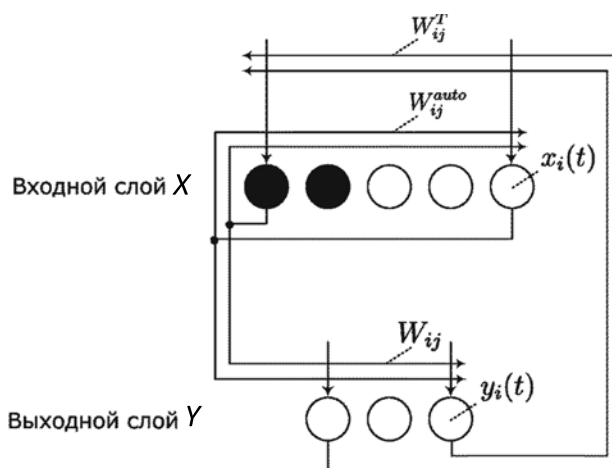


Рис. 1. Структура модели эпизодической памяти Осаны
● — хаотический нейрон; ○ — обычный нейрон



$$y_i(t) = f \left(\sum_{j=1}^{N+n} W_{ij} x_j(t) \right). \quad (1)$$

Нейроны входного слоя X описываются уравнениями:

$$z_i(t+1) = \sum_{j=1}^{N+n} W_{ij}^{auto} x_j(t) + k_f z_i(t); \quad (2)$$

$$v_i(t+1) = \sum_{j=1}^N W_{ij}^T y_j(t) + k_e v_i(t); \quad (3)$$

$$\eta_i(t+1) = -\alpha x_i(t) + k_r \eta_i(t) - a_i(t); \quad (4)$$

$$x_i(t+1) = f(\eta_i(t+1) + z_i(t+1) + \gamma v_i(t+1)), \quad (5)$$

где $x_i(t)$ — выход i -го нейрона слоя X в момент времени t ; $y_i(t)$ — выход i -го нейрона слоя Y в момент времени t ; N — число обычных нейронов в каждом слое; n — число хаотических нейронов в слое X ; W_{ij} — сила связи от j -го нейрона слоя X к i -му нейрону слоя Y ; W_{ij}^{auto} — сила связи от j -го к i -му нейрону внутри слоя X ; $a_i(t)$ — параметр для задания внешней стимуляции; α — параметр силы рефрактерности нейронов; k_f , k_e , k_r — параметры затухания связей; γ — коэффициент усиления сигнала между слоями; $f(c) = \frac{2}{1 + e^{-c/\varepsilon}} - 1$ — передаточная функция нейронов с параметром ε .

Хаотические и нехаотические нейроны отличаются значениями параметров k_f , k_r , k_e , α .

В моделировании используются M последовательностей S из m образов каждая: $S_i = \{s^1, \dots, s^k, \dots, s^m\}$, $i = \overline{1, M}$, где $s^k = \{s_1^k, \dots, s_j^k, \dots, s_N^k\}$ — k -й хранимый образ, а $s_j^k \in \{-1, 1\}$, $\forall j, k$ — j -й элемент k -го образа.

Веса W_{ij}^{auto} будут обеспечивать воспроизведение каждого образа (слой X), а веса W_{ij} — восстановление самих последовательностей, т. е. воспроизведение следующего образа в последовательности (слой Y) в соответствии с предыдущим (слой X).

Каждому образу из одной последовательности также соответствует контекстная информация: $c_i = \{c_{N+1}, \dots, c_j, \dots, c_{N+n}\}$, $i = \overline{1, M}$, где $c_j \in \{-1, 1\}$, $\forall j$ — j -й элемент контекста. Эта величина позволяет сети отличать разные последовательности с общими образами.

Ее генерация производится случайным образом независимо для каждой последовательности, а за ее хранение и воспроизведение отвечают веса W_{ij}^{auto} и хаотические нейроны слоя X . В итоге результирующий образ p^k состоит из исходного образа и контекста $p^k = s^k \cdot c^k$, где “ $\cdot$ ” — операция конкатенации.

Обучение (настройка весовых коэффициентов W_{ij}^{auto} и W_{ij}) сети выполняется перед непосредственным моделированием в соответствии с алгоритмом быстрого обучения (quick learning) [16]. Обучение выполняется в два этапа. Сначала производится настройка по правилу Хебба:

$$W_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^m p_i^k p_j^k, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}. \quad (6)$$

Затем производится корректировка полученных значений в соответствии с правилом

$$\Delta W_{ij} = -\frac{\lambda}{N+1} \left(\sum_{j=1}^N W_{ij} X_j - \xi Y_i \right) X_j,$$

если $\left(\sum_{j=1}^N W_{ij} X_j \right) Y_i \leq 0$ и $\Delta W_{ij} = 0, \forall i, j$ в ином случае, где λ — параметр релаксации, ξ — константа нормализации. Здесь мы обозначили текущий образ p^k за X , а следующий за ним в последовательности p^{k+1} за Y . Аналогично производится настройка весов W_{ij}^{auto} .

Моделирование начинается с инициализации слоя X одним из хранимых сетью образов. Как только сеть воспроизвела следующий в последовательности образ, необходимо произвести инициализацию слоя X в соответствии с получившимся результатом для продолжения распознавания. Момент, когда необходимо это сделать, определяется в соответствии с равенством нулю критерия $J = \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^N (y_i(t) - y_i(t-d))^2$, где D — некая константа.

В результате проведенного моделирования (параметры модели: $N = 100$; $n = 7$; $M = 3$; $m = 4$; $D = 3$; $\lambda = 1,9$; $\xi = 0,1$; $\varepsilon = 0,0015$; $a_i(t) = 0, \forall i, t$; $k_f = 0,1$; $k_e = 0,1$; $k_r = 0,95$; $\alpha = 10$, для нехаотических нейро-

Таблица 1

Статистика воспроизведения последовательностей образов
сетью Осаны

Последовательность	1	2	3	Ошибки
Воспроизведение, %	33	50	17	0

нов $k_f = k_e = k_r = \alpha = 0$) были получены результаты по распознаванию динамических образов (последовательностей) для $t = 2500$ итераций, приведенные в табл. 1. Используемые образы представлялись в виде изображений размером 10×10 . Частично динамика сети представлена на рис. 2. Из результатов моделирования видно, что сеть успешно справляется с задачей распознавания динамических образов с разным временным контекстом (сеть по одному общему для всех последовательностей образу восстано-

вила каждую из последовательностей).

Модель неокортекса-гиппокампа Куремото

Модель, предложенная группой японских ученых под руководством Куремото (T. Kuremoto) [14], учитывает в своем составе не только гиппокамп, но и энторинальную кору. Гиппокамп в данном случае выступает в роли временного хранилища информации. Модель основана на работе Ито (M. Ito) [17], по сравнению с которой нейроны области СА3 являются хаотиче-

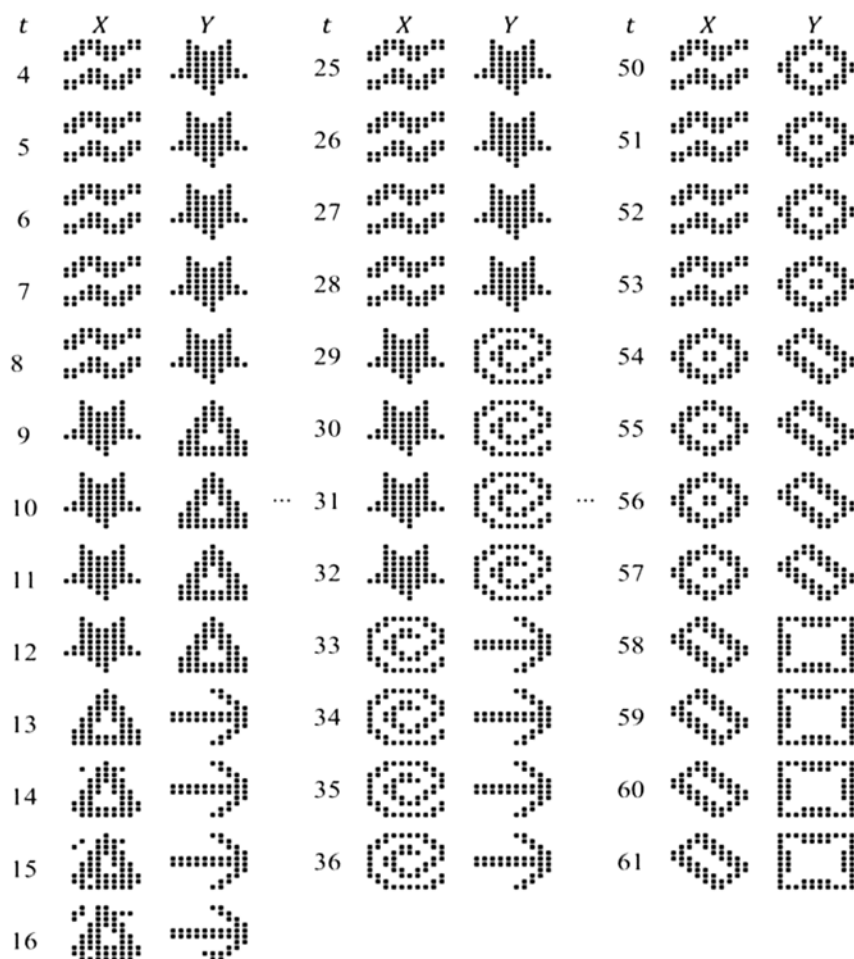


Рис. 2. Воспроизведение сетью Осаны каждой из хранимых последовательностей

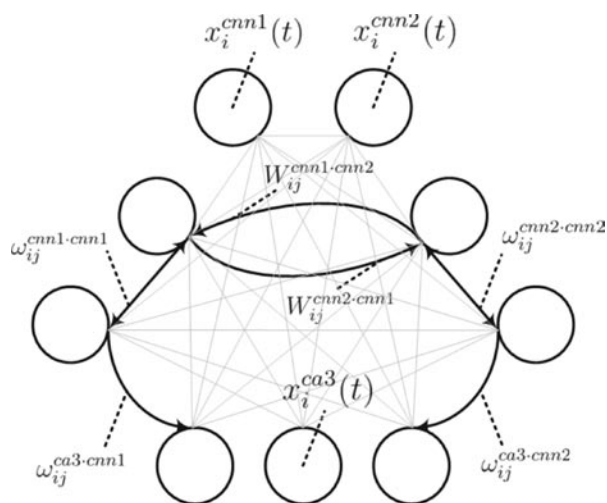


Рис. 3. Структура области CA3 модели Куремото

скими нейронами Айхары (в модели Ито область CA3 представлена однослойной сетью Хопфилда).

Подробная структура области CA3 изображена на рис. 3, а структура всей модели

Куремото приведена на рис. 4.

Первый слой энториальной коры необходим для фиксации внешнего стимула, нейроны ЗИ (зубчатая извилина) выполняют кодирование полученной информации, нейроны CA3 — хранение (кратковременная память), CA1 — декодирование. Вторым слоем энториальной коры является место хранения долговременной памяти.

Математическое описание модели приведено ниже. Для обозначения выхода i -го нейрона любого из слоев используется обозначение x_i^* (например, $x_i^{cx1}(t)$ — выход i -го нейрона первого слоя энториальной коры в момент времени t). Весовые коэффициенты настраиваются в соответствии с правилом Хебба и обозначаются как ω_{ij}^* (например, $\omega_{ij}^{cx2-cx1}$ — сила связи от j -го нейрона первого слоя к i -му нейрону второго слоя энториальной коры).

Рецепторы входного слоя (Input, сокращенно — I):

$$I_i(t) = \{0, 1\}. \quad (7)$$

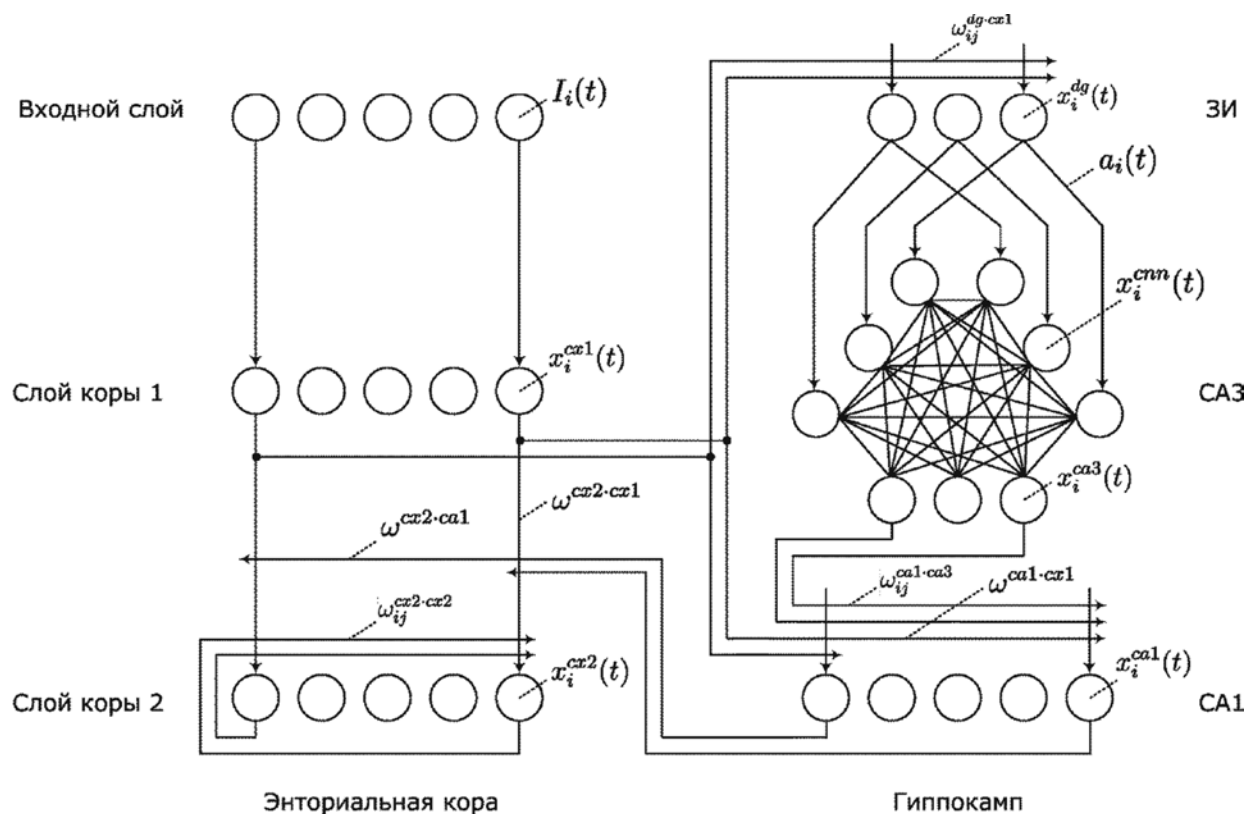


Рис. 4. Структура модели неокортекса-гиппокампа Куремото

Нейроны первого слоя энторальной коры (Cortex 1, сокращенно – cx1):

$$x_i^{cx1}(t) = I_i(t). \quad (8)$$

Нейроны второго слоя энторальной коры (Cortex 2, сокращенно – cx2):

$$x_i^{cx2}(t) = g \left(\sum_{j=1}^N \omega_{ij}^{cx2 \cdot cx2} x_j^{cx2}(t-1) + \omega^{cx2 \cdot cx1} x_i^{cx1}(t) + \omega^{cx2 \cdot ca1} x_i^{ca1}(t) - \theta^{cx2} \right), \quad (9)$$

$$\Delta \omega_{ij}^{cx2 \cdot cx2} = \alpha_{hc} x_i^{cx2}(t) x_j^{cx2}(t-1), \quad (10)$$

где N – число нейронов в слое; $g(c) = \begin{cases} 1, c \geq 0 \\ 0, c < 0 \end{cases}$ – передаточная функция нейронов; θ^{cx2} – порог срабатывания нейронов; α_{hc} – скорость обучения.

Нейроны зубчатой извилины (Dentate Gurus, сокращенно – dg):

$$x_i^{dg}(0) = random \in \{-1, 1\}, \forall i, \quad (11)$$

$$x_i^{dg}(t) = g \left(\sum_{j=1}^n \omega_{ij}^{dg \cdot cx1} x_j^{cx1}(t) - \theta^{dg} \right), \quad (12)$$

$$\Delta \omega_{ij}^{dg \cdot cx1} = \beta_{hc} x_i^{dg}(t) x_j^{cx1}(t), \quad (13)$$

где n – число нейронов в слое; $g(c) = \begin{cases} 1, c \geq 0 \\ 0, c < 0 \end{cases}$ – передаточная функция нейронов; θ^{dg} – порог срабатывания нейронов; β_{hc} – скорость обучения.

Нейроны области CA3 (каждый из двух входных слоев – CNN1, CNN2):

$$z_i(t+1) = \sum_{j=1}^N \omega_{ij} x_j(t) + k_f z_i(t), \quad (14)$$

$$v_i(t+1) = \sum_{j=1}^N W_{ij} x_j^*(t) + k_e v_i(t), \quad (15)$$

$$y_i(t+1) = -\alpha x_i(t) + k_r y_i(t) - a_i(t), \quad (16)$$

$$x_i(t+1) = f(y_i(t+1) + z_i(t+1) + \gamma v_i(t+1)), \quad (17)$$

$$\Delta \omega_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{m} (2x_i - 1)(2x_j - 1), i \neq j \\ 0, i = j \end{cases}, \quad (18)$$

$$\Delta W_{ij} = \beta (2x_i - 1)(2x_j^* - 1), \quad (19)$$

где $x_i(t)$ – выход i -го нейрона текущего слоя в момент времени t ; $x_i^*(t)$ – выход i -го нейрона второго слоя в момент времени t ; N – число нейронов в каждом слое; ω_{ij} – сила связи от j -го к i -му нейрону внутри одного слоя; W_{ij} – сила связи от j -го нейрона второго слоя к i -му нейрону текущего слоя; $a_i(t) = a + k \cdot A_i(t)$ – параметр для задания внешней стимуляции $A_i(t)$ с коэффициентами a и k ; $f(c) = \frac{1}{1 + e^{-c/\epsilon}}$ – передаточная функция нейронов с коэффициентом ϵ ; α – параметр силы рефрактерности нейронов; k_f, k_e, k_r – параметры затухания связей; γ – коэффициент усиления сигнала между слоями; β – скорость обучения.

Нейроны области CA3 (выходной слой):

$$x_i^{ca3}(t) = \begin{cases} 1, i = k \\ 0, i \neq k \end{cases}, \quad (20)$$

$$k = \arg \max_i \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^{ca3 \cdot cnn} (2x_j^{cnn}(t) - 1), \quad (21)$$

$$\Delta \omega_{ij}^{ca3 \cdot cnn} = \frac{1}{n} x_i^{ca3}(t) x_j^{cnn}(t), \quad (22)$$

где x_i^{cnn} – i -й нейрон одного из входных слоев области CA3 (CNN1 или CNN2); n – число нейронов в слоях области CA3.

Нейроны области CA1:

$$x_i^{ca1}(t) = g \left(\sum_{j=1}^N \omega_{ij}^{ca1 \cdot ca3} x_j^{ca3}(t) + \omega^{ca1 \cdot cx1} x_i^{cx1}(t) - \theta^{ca1} \right), \quad (23)$$

$$\Delta \omega_{ij}^{ca1 \cdot ca3} = \beta_{hc} x_i^{ca1}(t) x_j^{ca3}(t), \quad (24)$$

где N – число нейронов в слое; $g(c) = \begin{cases} 1, c \geq 0 \\ 0, c < 0 \end{cases}$ – передаточная функция нейронов; θ^{ca1} – порог срабатывания нейронов; β_{hc} – скорость обучения.

Область CA3 состоит из двухслойной хаотической нейронной сети (MCNN – Multi-Layered Chaotic Neural Network) и выходного соревновательного слоя. Нейроны каждого из слоев попеременно получают внешний стимул, обучаются и настраивают связи друг с другом. Когда один из слоев получает информацию от ЗИ, его

Таблица 2

Статистика воспроизведения последовательностей образов сетью Куремото

Последовательность	1	2	Ошибки
Воспроизведение, %	26	28	46

динамика является хаотической, в то время как другой слой находится в устойчивом состоянии. Каждый из слоев хранит отдельные образы (в виде ω_{ij}), а воспроизведение целых последовательностей осуществляется через настройку W_{ij} .

Управление хаотической динамикой определяется вычислением критерия $\Delta x = \sum_{i=1}^N |x_i(t+1) - x_i(t)|$ и сравнением его с параметром θ . Если $\Delta x > \theta$, то динамика слоя должна быть хаотической, иначе слой переключается в статический режим. Каждому режиму соответствуют свои значения параметров k_p, k_r, α . При моделировании работы неокортекса-гиппокампа Куремото используются M последовательностей S из m обра-

зов каждая: $S_i = \{s^1, \dots, s^k, \dots, s^m\}, i = \overline{1, M}$, где $s^k = \{s_1^k, \dots, s_j^k, \dots, s_N^k\}$ – k -й хранимый образ, а $s_j^k \in \{-1, 1\}, \forall j, k$ – j -й элемент k -го образа. Обучение сети (настройка всех весовых коэффициентов) производится во время непосредственного моделирования.

Моделирование проводилось в пять этапов (на рис. 4 они обозначены римскими цифрами).

I. Подача двух последовательностей на слой нейронов Cortex 1 и формирование кратковременной памяти в гиппокампе (настройка $\omega_{ij}^{dg:cx1}, \omega_{ij}^{ca3:cnm}, \omega_{ij}, W_{ij}, \omega_{ij}^{ca1:ca3}$).

II. Подача первого образа каждой из последовательностей, проверка сформировавшейся кратковременной памяти.

III. Проверка формирования долговре-

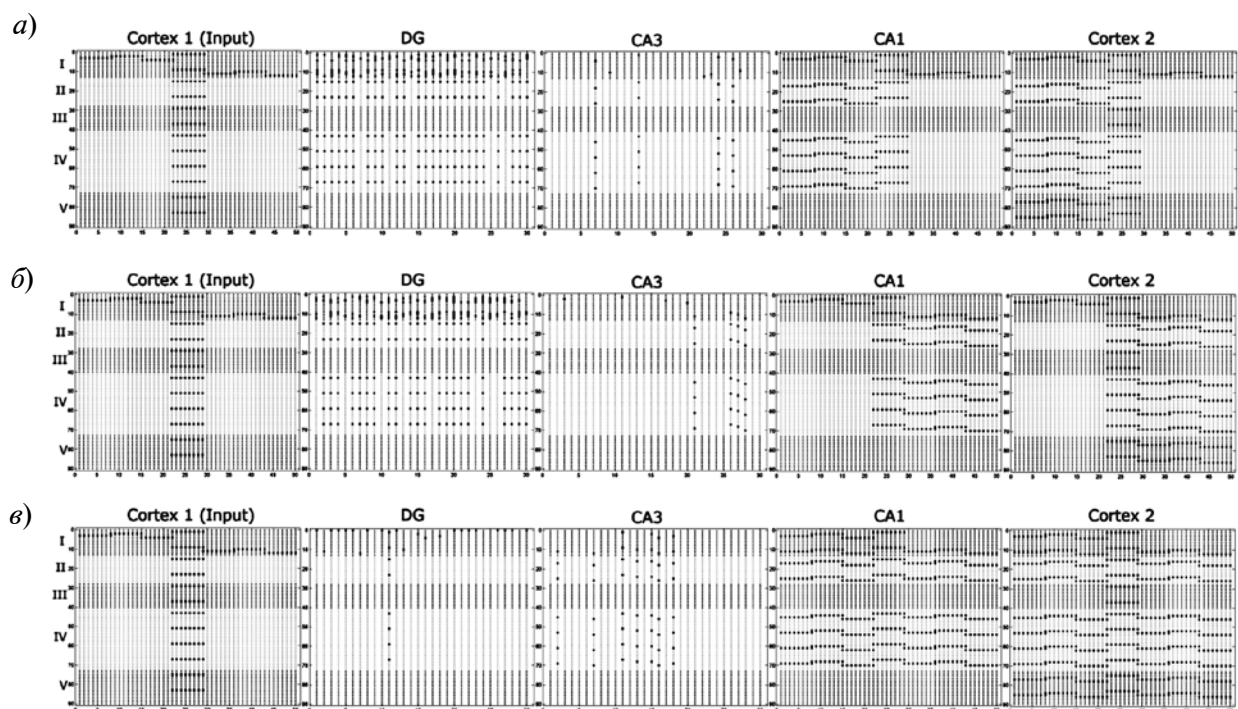


Рис. 5. Динамика сети Куремото в случае воспроизведения каждой из входных последовательностей (а, б); моделирование сети Ито (в).

По оси ординат отложено дискретное время t (сверху вниз), по оси абсцисс — активность каждого нейрона соответствующего слоя

менной памяти во втором слое энториальной коры путем «отключения» гиппокампа от системы.

IV. Многократная подача первого образа последовательностей для формирования в долговременной памяти одной из них (настройка $\omega_{ij}^{cx2 \cdot cx2}$).

V. Повторная проверка формирования долговременной памяти во втором слое энториальной коры.

В результате проведенного моделирования (параметры модели: $N = 50$; $n = 30$; $m = 4$; $M = 2$; $\theta^{dg} = 5,5$; $\theta^{cx2} = \theta^{ca1} = 0,5$; $\beta_{hc} = \beta = 1$; $\alpha_{hc} = 0,012$; $\varepsilon = 0,015$; $\gamma = 30$; $\theta = 5$; $k = 30$; $a = 0$; $\omega^{cx2 \cdot cx1} = \omega^{cx2 \cdot ca1} = \omega^{ca1 \cdot cx1} = 1$; $k_e = 0,2$; $k_f = 0,02$; $k_r = 0,1$; $\alpha = 1$, для нехаотических нейронов $k_f = k_r = \alpha = 0$) были получены результаты по распознаванию динамических образов (последовательностей) для 50 разных начальных инициализаций x^{dg} , приведенные в табл. 2.

Динамика сети Куремото в случае воспроизведения первой и второй из последовательностей представлена на рис. 5 а и б соответственно, а результат моделирования сети Ито для аналогичной задачи представлен на рис. 5 в.

Анализируя результаты, видим, что данная модель позволяет решать поставленную задачу: после подачи входных последовательностей (этап I) формируется промежуточная память (этап II); на данном этапе видим, что в долговременной памяти эти изображения еще не закреплены (этап III); производится повтор образов

для закрепления в долговременной памяти (этап IV); в результате нужная временная последовательность закрепляется в Cortex 2 как долговременная память (этап V).

Из результатов моделирования также видно, что модель Куремото за счет наличия хаотической динамики позволяет решить задачу распознавания последовательностей образов с общими элементами.

Хаотическая модель гиппокампа Тсуды

Модель, предложенная японскими учеными Тсудой (I. Tsuda) и Куродой (S. Kuroda) [15], демонстрирует участие хаотической динамики в кодировании временных последовательностей образов. Ее структура приведена на рис. 6.

Область CA3 в данной модели отвечает за хранение динамических образов (ассоциативная память), ее динамика является хаотической. Область CA1 отвечает за кластеризацию последовательностей образов за счет иерархической самоподобной структуры на основе множества Кантора. Каждый образ в отдельности хранится в CA3, как ассоциативная память, а его «контекст» (в данном случае временной) учитывается в виде особой структуры в пространстве состояний нейронов CA1.

Математическое описание нейронов области CA3:

$$x_i(t+1) = H_x \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \omega_{ij} x_j(t) - d_i y_i(t) \right) \quad (25)$$

с вероятностью p_x ;

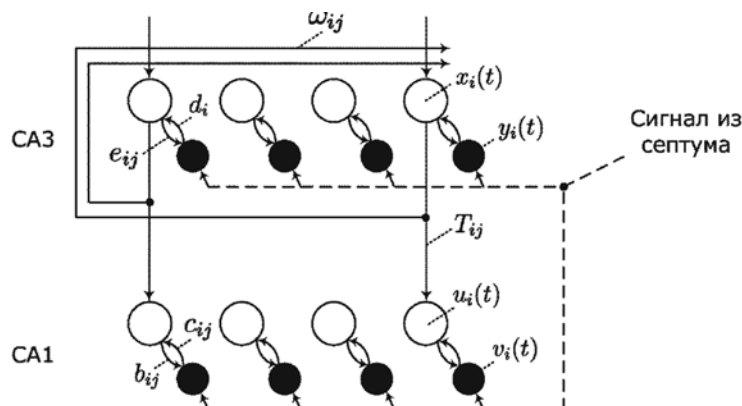


Рис. 6. Структура модели гиппокампа Тсуды
○ — возбуждающий нейрон; ● — тормозящий нейрон



$$x_i(t+1) = x_i(t) \quad (26)$$

с вероятностью $1 - p_x$;

$$y_i(t+1) = H_y \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e_{ij} x_j(t) \right) \quad (27)$$

с вероятностью p_y ;

$$y_i(t+1) = 0 \quad (28)$$

с вероятностью $1 - p_y$,

где $x_i(t)$ – выход i -го возбуждающего нейрона СА3 в момент времени t ; $y_i(t)$ – выход i -го тормозящего нейрона СА3 в момент времени t ; N – число нейронов каждого типа в области СА3; ω_{ij} – сила связи от j -го возбуждающего к i -му возбуждающему нейрону СА3; e_{ij} – сила связи от j -го возбуждающего к i -му тормозящему нейрону СА3; d_i – сила связи от i -го тормозящего к i -му возбуждающему нейрону СА3; $H_x(c) = H_y(c) = \frac{2}{1 + e^{-\lambda_{ca3}c}} - 1$ – передаточная функция нейронов СА3 с коэффициентом λ_{ca3} .

Обучение (настройка весовых коэффициентов ω_{ij}) сети выполняется перед непосредственным моделированием по правилу Хебба:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m s_i^k s_j^k, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}, \quad (29)$$

где $s_j^k \in \{-1, 1\}$, $\forall j, k$ – j -й элемент k -го образа; m – количество образов, хранимых сетью.

Математическое описание нейронов области СА1:

$$u_i(t+1) = H_u \left(\varepsilon \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_{ij} \frac{x_j^*(t) + 1}{2} - \delta \sum_{j=1}^n c_{ij} v_j(t) + \theta \right), \quad (30)$$

$$v_i(t) = \sum_{j=1}^n b_{ij} u_j(t), \quad (31)$$

$$x_j^*(t) = \begin{cases} x_j(t), & x_1(t) > 0 \\ -x_j(t), & x_1(t) < 0 \end{cases}, \quad (32)$$

где $u_i(t)$ – выход i -го возбуждающего нейрона СА1 в момент времени t ; $v_i(t)$ – выход

i -го тормозящего нейрона СА1 в момент времени t ; $x_i(t)$ – выход i -го возбуждающего нейрона СА3 в момент времени t ; N – число нейронов каждого типа в области СА3; n – количество нейронов каждого типа в области СА1; T_{ij} – сила связи от j -го возбуждающего нейрона СА3 к i -му возбуждающему нейрону СА1; c_{ij} – сила связи от j -го тормозящего к i -му возбуждающему нейрону СА1; b_{ij} – сила связи от j -го возбуждающего к i -му тормозящему нейрону СА1; $H_x(c) = H_y(c) = \frac{2}{1 + e^{-\lambda_{ca1}c}} - 1$ – передаточная функция нейронов СА1 с коэффициентом λ_{ca1} .

Динамика нейронов СА3 меняется с хаотической на статическую периодически (через время T). Каждому режиму соответствуют свои значения для параметров d_i , δ , θ . Биологическое обоснование этого эффекта – сигнал от септума (septum effect), воздействующий на тормозящие нейроны СА1 и СА3.

Было проведено моделирование данной сети (параметры моделирования: $N = 33$; $n = 32$; $\varepsilon = 0,032$; $\delta = 0,8$, для нехаотического режима $\delta = 0,05$; $\lambda_{ca1} = \lambda_{ca3} = 50$; $m = 3$; $\theta = 0,5$, для нехаотического режима $\theta = 0$; $p_x = 0,6$; $p_y = 1$; $T = 2$; $T_{ij} = random \in [0, 1]$, $\forall i, j$; $d_i = random \in [0, 1]$, $\forall i$, для нехаотического режима $d_i = 0$, $\forall i$; $e_{ij} = random \in [0, 1]$, $\forall i, j$;

$b_{ij} = c_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$) с использованием ортогональных образов.

При отсутствии влияния тормозящих нейронов ($d_i = 0, \forall i$) динамика СА3 является устойчивой, т. е. начальное состояние сети, представленное в виде образа (возможно зашумленного), со временем сходится к одному из устойчивых аттракторов и не выходит из области его притяжения, т. е. реализуется ассоциативная динамика. При $d_i \neq 0, \forall i$ динамика сети является хаотической, но при этом сеть воспроизводит каждый из запомненных образов.

Нейроны области СА1 обеспечивают кодирование временных последовательностей, полученных от нейронов СА3. В результате такого кодирования в пространстве состояний нейронов СА1 образуется фрактальная структура, что показано на рис. 7.

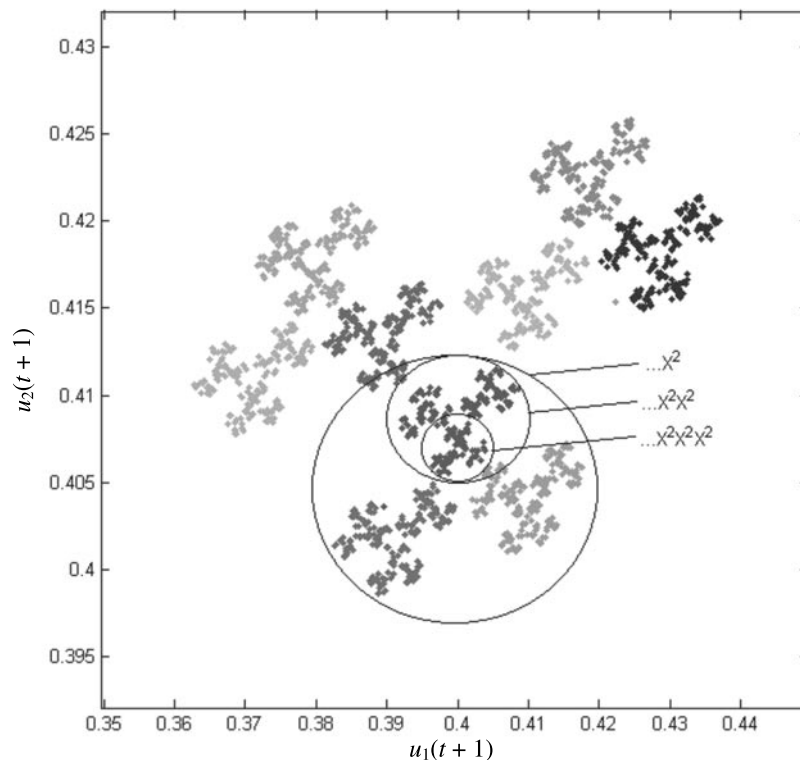


Рис. 7. Пространство состояний нейронов при моделировании области CA1 модели Тсуды

Таким образом, каждой области фазового пространства состояний нейронов CA1 соответствует номер текущего (наблюдаемого на выходе сети в данный момент времени) образа. Количество таких областей соответствует количеству хранимых сетью паттернов. Каждая область, в свою очередь, делится еще на такое же количество кластеров, в соответствии с тем, какой образ был на выходе сети в предшествующий момент времени и т. д.

Результаты анализа и сравнения моделей гиппокампа

Все рассмотренные модели используют динамику хаотических элементов для решения задачи обработки динамической информации, без применения которой эту задачу решить не удастся.

Модель Осаны за счет наличия хаотической динамики позволяет различать пересекающиеся последовательности образов (те, которые имеют общие образы в своем составе), т. е. учитывать временной контекст. По

сравнению с другими моделями эта сеть не является именно моделью гиппокампа, но задача, решаемая с ее помощью, непосредственно относится к его функциям. Также в структурном плане можно прийти к выводу о том, что модель SEAM может являться прототипом области CA3 гиппокампа. Для этой модели обучение сети не ограничивается правилом Хебба, а требуется использовать дополнительные алгоритмы, как видно из результатов анализа модели.

Модель Куремото также позволяет решить задачу распознавания динамических образов с учетом временного контекста. При этом она является наиболее полной в функциональном плане (обеспечивает не только распознавание динамических образов, но и своеобразную «разгрузку» памяти, т. е. перевод необходимой части воспоминаний из кратковременной в долговременную), но при этом обладает относительно сложным описанием и большим количеством параметров. Отметим, что связку из структур DG+CA3+CA1 можно рассматри-



вать и отдельно, ограничиваясь только распознаванием динамических образов.

Сравнение модели Куремото с моделью Осаны показало, что по информационной емкости сеть Осаны более предпочтительна. Также было выполнено моделирование модели CEAM и сети MCNN (из модели Куремото) с целью выявления влияния шума на качество распознавания. Модель MCNN позволяет восстановить последовательность при шуме в 25 %, в то время как сеть CEAM успешно решает задачу при 45 %-ом шуме. Для повышения качества распознавания возможен учет работы других отделов мозга без нарушения целостности системы в целом.

Модель Тсуды демонстрирует свойство самоорганизации, проявляющееся при кодировании образов в пространстве состояний нейронов области CA1. Отметим, что подобное свойство в представлении динамической информации было замечено в реальных нейронах [18]. Динамика слоя CA3 представляет собой не только хранимые образы, но и хаотическую составляющую, поэтому в результате образуемые кластеры могут несколько размываться. Этого можно избежать, используя более точную хаотическую нейронную сеть, а также снижая размерность фазового пространства нейронов в области CA1 в процессе визуализации образованных кластеров.

Необходимость использования биологически ориентированных моделей обра-

ботки информации обусловлена стремлением к более универсальной и комплексной обработке, которая свойственна живым организмам. Многие научные группы рассматривают интеллектуальную деятельность мозга с точки зрения одной большой динамической системы, подчеркивая важность общего, комплексного рассмотрения ее активности. Модели, рассмотренные в данной статье, построены по принципам обработки информации в нелинейных динамических системах и могут быть использованы в дальнейшем в технических системах для повышения их универсальности.

В результате подробного анализа моделей сделаны выводы об их особенностях и выполнено их сравнение на основе проведенного всестороннего моделирования. Кроме того, определены направления их модификации и развития: во-первых, путем объединения и расширения принципов, заложенных в их основу; во-вторых, путем интегрирования в рассмотренные структуры других биоинспирированных моделей; в-третьих, путем «искусственной» модификации алгоритмов обучения с целью уменьшения количества необходимой априорной информации и повышения качества распознавания.

Учитывая выявленные особенности, на основе рассмотренных моделей представляется возможным перейти к разработке методов комплексной обработки информации и адаптивных систем, реализующих подобные алгоритмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Benderskaya E.** Nonlinear Trends in Modern Artificial Intelligence: A New Perspective // *Topics in Intelligent Engineering and Informatics*. 2013. Vol. 4. Pp. 113–124.
2. **Tsuda I.** Chaotic itinerancy and its roles in cognitive neurodynamics // *Current Opinion in Neurobiology*. 2015. Vol. 31. Pp. 67–71.
3. **Tsuda I.** Toward an interpretation of dynamic neural activity in terms of chaotic dynamical systems // *Behavioral and Brain Sciences*. 2001. Vol. 24. Pp. 793–810.
4. **Freeman W.** Simulation of chaotic EEG patterns with a dynamic model of the olfactory system // *Biological Cybernetics*. 1987. Vol. 56. Pp. 139–150.
5. **Aihara K., Takabe T., Toyoda M.** Chaotic neural networks // *Physics Letters A*. 1990. Vol. 144. No. 6, 7. Pp. 333–340.
6. **Obayashi M., Koga S., Feng L., Kuremoto T., Kobayashi K.** Handwriting character classification using Freeman's olfactory KIII model // *Artificial Life and Robotics*. 2012. Vol. 17. Pp. 227–232.
7. **Li G., Zhang J., Wang Y., Freeman W.** Face Recognition Using a Neural Network Simulating Olfactory Systems // *LNCS*. 2006. 3972. Pp. 93–97.
8. **Qin K., Oommen B.** Chaotic pattern recognition: The spectrum of properties of the Adachi Neural Network // *Lecture Notes in Computer Science*. 2008. Vol. 5342. Pp. 540–550.

9. **Matykieicz P.** Chaotic Itinerary for Patterns Separation // *Lecture Notes in Computer Science*. 2004. Vol. 3070. Pp. 235–240.

10. **Voicu H., Kozma R., Wong D., Freeman W.** Spatial navigation model based on chaotic attractor networks // *Connection Science*. 2004. Vol. 16. No. 1. Pp. 1–19.

11. **Obayashi M., Narita K., Okamoto Y., Kuremoto T., Kobayashi K., Feng L.** A Reinforcement Learning System Embedded Agent with Neural Network – Based Adaptive Hierarchical Memory Structure // *Advances in Reinforcement Learning*. 2011. Pp. 189–208.

12. **Игумен Феофан (Крюков).** Роль гиппокампа в долговременной памяти: системно-динамический подход // *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*. 2007. Т. 57. № 3. С. 261–278.

13. **Kitada J., Osana Y., Hagiwara M.** Episodic chaotic associative memory // *IEEE Internat. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*. 1998. Pp. 3629–3634.

14. **Kuremoto T., Eto T., Kobayashi K., Obayashi M.** A hippocampus-neocortex model for chaotic association // *Trends in Neural Computation (Studies in Computational Intelligence)*. 2007. Vol. 35. Pp. 111–133.

15. **Tsuda I., Kuroda S.** Cantor coding in the hippocampus // *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*. 2001. Vol. 18. Pp. 249–258.

16. **Hattori M., Hagiwara M., Nakagawa M.** Quick learning for bidirectional associative memory // *IEICE Japan*. 1994. Vol. E77-D. No. 4. Pp. 385–392.

17. **Ito M., Miyake S., Inawashiro S., Kuroiwa J., Sawada Y.** Long-term memory of temporal patterns in a hippocampus-cortex model // *Technical Report of IEICE*. 2000. Vol. 18. Pp. 25–32. (jap)

18. **Fukushima Y., Tsukada M., Tsuda I., Yamaguti Y., Kuroda S.** Coding mechanisms in hippocampal networks for learning and memory // *Advances in Neuro-Information Processing: Lecture Notes in Computer Science*. 2009. Vol. 5506. Pp. 72–79.

REFERENCES

1. **Benderskaya E.** Nonlinear Trends in Modern Artificial Intelligence: A New Perspective, *Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, 2013, Vol. 4, Pp. 113–124.

2. **Tsuda I.** Chaotic itinerancy and its roles in cognitive neurodynamics, *Current Opinion in Neurobiology*, 2015, Vol. 31, Pp. 67–71.

3. **Tsuda I.** Toward an interpretation of dynamic neural activity in terms of chaotic dynamical systems, *Behavioral and Brain Sciences*, 2001, Vol. 24, Pp. 793–810.

4. **Freeman W.** Simulation of chaotic EEG patterns with a dynamic model of the olfactory system, *Biological Cybernetics*, 1987, Vol. 56, Pp. 139–150.

5. **Aihara K., Takabe T., Toyoda M.** Chaotic neural networks, *Physics Letters A*, 1990, Vol. 144, No. 6, 7, Pp. 333–340.

6. **Obayashi M., Koga S., Feng L., Kuremoto T., Kobayashi K.** Handwriting character classification using Freeman's olfactory KIII model, *Artificial Life and Robotics*, 2012, Vol. 17, Pp. 227–232.

7. **Li G., Zhang J., Wang Y., Freeman W.** Face Recognition Using a Neural Network Simulating Olfactory Systems, *LNCS*, 2006, 3972, Pp. 93–97.

8. **Qin K., Oommen B.** Chaotic pattern recognition: The spectrum of properties of the Adachi Neural Network, *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, Vol. 5342, Pp. 540–550.

9. **Matykieicz P.** Chaotic Itinerary for Patterns Separation, *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, Vol. 3070, Pp. 235–240.

10. **Voicu H., Kozma R., Wong D., Freeman W.** Spatial navigation model based on chaotic attractor networks, *Connection Science*, 2004, Vol. 16, No. 1, Pp. 1–19.

11. **Obayashi M., Narita K., Okamoto Y., Kuremoto T., Kobayashi K., Feng L.** A Reinforcement Learning System Embedded Agent with Neural Network – Based Adaptive Hierarchical Memory Structure, *Advances in Reinforcement Learning*, 2011, Pp. 189–208.

12. **Iguмен Фефан (Крюков).** Роль гиппокампа в долговременной памяти: системно-динамический подход [The role of the hippocampus in long-term memory: system dynamic approach], *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti im. I.P. Pavlova [I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity]*, 2007, Vol. 57, No. 3, Pp. 261–278. (rus)

13. **Kitada J., Osana Y., Hagiwara M.** Episodic chaotic associative memory, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1998, Pp. 3629–3634.

14. **Kuremoto T., Eto T., Kobayashi K., Obayashi M.** A hippocampus-neocortex model for chaotic association, *Trends in Neural Computation (Studies in Computational Intelligence)*, 2007, Vol. 35, Pp. 111–133.

15. **Tsuda I., Kuroda S.** Cantor coding in the hippocampus, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 2001, Vol. 18, Pp. 249–258.

16. **Hattori M., Hagiwara M., Nakagawa M.** Quick learning for bidirectional associative memory, *IEICE Japan*, 1994, Vol. E77-D, No. 4, Pp. 385–392.



17. Ito M., Miyake S., Inawashiro S., Kuroiwa J., Sawada Y. Long-term memory of temporal patterns in a hippocampus-cortex model, *Technical Report of IEICE*, 2000, Vol. 18, Pp. 25–32. (jap)

18. Fukushima Y., Tsukada M., Tsuda I.,

Yamaguti Y., Kuroda S. Coding mechanisms in hippocampal networks for learning and memory. *Advances in Neuro-Information Processing, Lecture Notes in Computer Science*, 2009, Vol. 5506, Pp. 72–79.

БЕНДЕРСКАЯ Елена Николаевна — доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: helen.bend@gmail.com

BENDERSKAYA Elena N. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: helen.bend@gmail.com

ПЕРЕШЕИН Артем Олегович — студент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: pereshein.artem@gmail.com

PERESHEIN Artem O. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: pereshein.artem@gmail.com

DOI: 10.5862/JCSTCS.234.7

УДК 004.832.32

В.А. Павлов, В.Г. Пак

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ТЕОРЕМ ИНТУИЦИОНИСТСКОЙ ЛОГИКИ ОБРАТНЫМ МЕТОДОМ МАСЛОВА

V.A. Pavlov, V.G. Pak

AN EXPERIMENTAL COMPUTER PROGRAM FOR AUTOMATED REASONING IN INTUITIONISTIC LOGIC USING THE INVERSE METHOD

Статья посвящена обратному методу Маслова, который подходит для автоматизации доказательств в различных логических исчислениях: логика высказываний, классическая логика первого порядка, интуиционистская логика, модальные логики и т. д. Приведен обзор основных публикаций по обратному методу, рассмотрено разработанное авторами исчисление обратного метода для интуиционистской логики первого порядка. Предложены адаптированные и оригинальные стратегии оптимизации для этого исчисления. Рассмотрены алгоритм логического вывода в полученном исчислении и разработанная на его основе программа автоматического доказательства теорем WhaleProver. Приведены результаты сравнения разработанной программы с существующими аналогами на задачах из библиотеки ILTP.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ТЕОРЕМ; ЛОГИЧЕСКИЙ ВЫВОД; ОБРАТНЫЙ МЕТОД; МЕТОД МАСЛОВА; ИНТУИЦИОНИСТСКАЯ ЛОГИКА.

We discuss the inverse method of automated theorem-proving that was invented by S. Maslov. The inverse method can be applied to various logics: propositional logic, first-order logic, modal logics, intuitionistic logic, etc. In the current article, we present an overview of the key publications on the inverse method, describe in detail an inverse method calculus for first-order intuitionistic logic. We propose adapted as well as original optimizing strategies for the developed calculus. We discuss a proof search algorithm for the proposed calculus and our program implementation named WhaleProver. We compare WhaleProver with state-of-the-art intuitionistic theorem provers on problems from the ILTP library, which is a common benchmarking library for testing intuitionistic theorem provers.

AUTOMATED THEOREM PROVING; SEQUENT CALCULUS; INVERSE METHOD; INTUITIONISTIC LOGIC; ILTP.

Автоматическое доказательство теорем (АДТ) — активно развивающееся направление математической логики и искусственного интеллекта. Основные задачи АДТ заключаются в разработке методик, алгоритмов и компьютерных программ (*систем АДТ*), автоматизирующих доказательство утверждений в той или иной формальной теории.

Системы АДТ применяются не только в математике как «умные помощники» ученых, но и для решения актуальных практических задач: верификации программного, аппаратного обеспечения и сетевых протоколов, планирования, представления

знаний (в частности, логического вывода в базах знаний и семантических сетях), обработки естественного языка и т. д.

Читателям, не знакомым близко с темой автоматического доказательства теорем, а также желающим расширить свои знания в этой области, мы можем порекомендовать книги по теме [5, 12, 25].

Автоматический логический вывод в интуиционистской логике имеет особое значение для верификации программного обеспечения благодаря существованию изоморфизма Карри–Ховарда. Естественным приложением интуиционистской логики в математике является формализация



конструктивных математических теорий.

Следует отметить, что наиболее разработанный метод логического вывода для классической логики первого порядка — метод резолюций — в чистом виде неприменим к интуиционистской логике. Большинство систем АДТ для интуиционистской логики первого порядка используют табличные методы логического вывода, однако существующие реализации пока не способны конкурировать по эффективности с наиболее совершенными системами для классической логики.

В связи с приведенной выше проблемой, особенный научный и практический интерес представляют исследования обратного метода логического вывода, предложенного советским ученым С.Ю. Масловым еще в 1964 г., но активно применяющегося в практических системах АДТ лишь в течение последних лет.

Определения и используемые обозначения

В статье используется стандартный язык логики первого порядка, с символами логических операций $\neg, \vee, \wedge, \supset$; кванторами $\forall$ и $\exists$; логической константой $\perp$; предикатными символами P, Q, R и т. д.; переменными x, y, z и т. д.; функциональными символами f, g, h ; символами для произвольных термов r, s, t ; символами для произвольных формул A, B, C и т. д.

Интуиционистская логика первого порядка представляет собой формализацию интуиционистского (или конструктивного) типа рассуждений, в которой стандартные логические связки интерпретируются отличным от классической логики образом. Так, интуиционистское доказательство утверждения $\exists x P(x)$ заключается в представлении конкретного примера x такого, что $P(x)$, или, по крайней мере, указывает метод, позволяющий в принципе найти такой пример. В интуиционистской логике неприемлем закон исключенного третьего $A \vee \neg A$ и закон двойного отрицания $(\neg\neg A) \supset A$.

Вхождение переменной x в выражение называется *связанным*, если оно совпадает с конструкцией вида $\forall x$ или $\exists x$, либо входит в область действия такого кванто-

ра. Вхождение переменной называется *свободным*, если оно не связано. Переменная свободна в выражении E , если она входит свободно в E . Переменная связана в E , если она входит связанно в E .

Замкнутая формула — формула, которая не содержит свободных переменных. *Ректифицированная формула* — замкнутая формула, в которой все кванторы связывают разные переменные.

Подстановка вместо переменных $x_1, \dots, x_n$ — это выражение вида $\{x_1/t_1, \dots, x_n/t_n\}$, где все переменные x_i различны и $x_i \neq t_i$ для всех $i = 1, \dots, n$. Для произвольного выражения E и подстановки $\theta = \{x_1/t_1, \dots, x_n/t_n\}$, выражение $E\theta$ обозначает результат одновременной подстановки термов $t_1, \dots, t_n$ в места всех свободных вхождений переменных $x_1, \dots, x_n$ в выражении E .

Запись σ_x обозначает подстановку, полученную из σ «вычеркиванием» элемента с $x_i = x$ (если таковой имеется).

Наиболее общий унификатор подстановок σ и τ — это наиболее общий унификатор (см. подробнее [12]) упорядоченных наборов $(x_1\sigma, \dots, x_n\sigma)$ и $(x_1\tau, \dots, x_n\tau)$, где $\{x_1, \dots, x_n\}$ — объединение областей определения σ и τ .

Свободной подформулой формулы F является любая формула G , входящая в F . *Подформулами* F являются все такие формулы G' , которые получаются из ее подформул применением некоторой подстановки вместо переменных. Для фиксированной формулы F *знаки* ее подформул определяются так: положительный знак имеют подформулы, не входящие в подформулы вида $\neg A$ или в левую часть подформул вида $A \supset B$, либо имеющие четное число вхождений в подформулы указанного вида; отрицательный знак имеют все остальные подформулы.

Секвенция — это условное суждение вида $A_1, \dots, A_n \vdash B_1, \dots, B_m$, где A_i ($i = 1, \dots, n$) и B_j ($j = 1, \dots, m$) — формулы. Секвенция интерпретируется как утверждение «если A_1 и ... и A_n истинны, то B_1 или ... или B_m истинны».

Секвенциальное исчисление — логическое исчисление, выводимыми объектами в ко-

тором являются секвенции.

Свойство подформульности логического исчисления выполняется, если для каждой выводимой в исчислении формулы F существует доказательство, содержащее только подформулы F .

Обратный метод Маслова

Историческая справка. Обратный метод был изобретен советским математиком С.Ю. Масловым в 1964 г. [6]. Свое название метод получил благодаря тому, что строит логический вывод в направлении «сверху вниз» (от аксиом к доказываемой формуле), обратном традиционному направлению поиска вывода в секвенциальных исчислениях.

Первый вариант обратного метода [6] был предназначен для доказательства предваренных формул логики первого порядка. Впоследствии С.Ю. Маслов обобщил свой метод на произвольные *секвенциальные исчисления* без правила сечения, обладающие свойством *подформульности* [7]. Общая схема метода может быть конкретизирована для любой подходящей логики.

Долгое время обратный метод оставался в тени метода резолюций [12, 25] и табличных методов [1, 4, 5, 14]. Развитием метода занималась лишь небольшая группа коллег Маслова. Однако в последние годы интерес к обратному методу стал постепенно возрастать, в том числе и за рубежом.

Отметим некоторые преимущества обратного метода, в частности, важные при автоматизации логического вывода в интуиционистской логике:

1) метод эффективно использует свойство подформульности, позволяя избежать порождения множества избыточных секвенций, не имеющих отношения к самой формуле;

2) хорошо подходит для автоматизации логического вывода в неклассических логиках (интуиционистская логика, различные модальные логики и т. д.);

3) строит вывод в естественном направлении: от аксиом к доказываемой формуле;

4) метод лишен ряда недостатков, характерных для табличных методов: явля-

ется локальным, не требует использования механизмов отката в случае неудачи, контроля над возникновением циклов;

5) имеет широкие теоретические возможности для исследования выводимых классов формул.

Впоследствии С.Ю. Масловым и другими учеными были построены конкретизации общей схемы обратного метода для различных логических исчислений. В приложениях к [12] изложена относительно простая формулировка обратного метода для предваренных формул логики первого порядка. В более современной, но близкой по содержанию статье [19] приведена альтернативная формулировка с кратким доказательством полноты. В [15] приведены «резольтивноподобные» (т. е. похожие на резольтивные методы, *resolution-like*) исчисления обратного метода для логики высказываний и классической логики первого порядка. Статья также содержит важный исторический обзор развития идей обратного метода.

Работа [13], наряду с [7], на настоящее время может считаться одним из наиболее значимых и фундаментальных трудов по обратному методу. В ней ее авторы, А. Дегтярёв и А. Воронков, обобщили результаты работ по обратному методу за последние десятилетия и продемонстрировали, как использовать «универсальный рецепт» [11] для построения различных исчислений обратного метода.

Обратный метод Маслова, как и метод резолюций, оказался недостаточно эффективным без использования специальных *стратегий оптимизации*, направленных на сужение пространства поиска вывода. Ранние работы, посвященные стратегиям для обратного метода (С.Ю. Маслов использует термин «тактики»), включают [8–10].

А. Воронков в статье [27] предложил общий подход адаптации некоторых стратегий из метода резолюций для обратного метода и доказал несколько общих теорем, определяющих стратегии сужения пространства поиска вывода для обратного метода. В той же работе автор продемонстрировал, как могут выглядеть конкретизации этих стратегий, на примере классической



логики первого порядка и модальной логики S4. В статье указано, что общий подход можно применить и к другим логикам, в частности, к интуиционистской логике.

Обратному методу для интуиционистской логики первого порядка посвящены работы [18, 23 и 17].

Г. Минц в работе [18] предложил несколько стратегий для интуиционистской логики (высказываний и первого порядка). Однако в той части статьи, которая посвящена стратегиям для интуиционистской логики первого порядка, рассмотрены стратегии только для «резольтивноподобной» модификации обратного метода.

Т. Таммет предложил исчисление обратного метода и несколько стратегий для интуиционистской логики первого порядка [23].

В [17] рассмотрено применение стратегий, носящих название *поляризации* (polarization) и *фокусировки* (focusing), к интуиционистскому исчислению обратного метода.

Для классической логики в разные периоды времени было разработано несколько реализаций обратного метода, например, [2, 26].

Для интуиционистской логики первого порядка также существуют реализации. В [23] Т. Таммет реализовал систему АДТ для интуиционистской логики на базе своей программы Gandalf для классической логики. К сожалению, корректность этой реализации подвергается сомнению [24]. Согласно [13], используемое в [23] интуиционистское исчисление не обладает свойством полноты. В другой работе [17] описана эффективная реализация, но при этом не используются многие важные теоретические результаты, полученные в работах других указанных выше авторов.

Все изложенное выше раскрывает актуальную потребность разработки эффективных и корректных алгоритмов вывода формул интуиционистской логики первого порядка, реализующих наиболее существенные и универсальные достижения в теории логического вывода обратным методом Маслова. Ликвидация указанного пробела между теорией и практикой позво-

лит увеличить эффективность алгоритмов и расширить область применения систем АДТ для интуиционистской логики первого порядка.

Многосукцедентное исчисление обратного метода для вывода формул интуиционистской логики первого порядка. Для построения исчисления мы применяем «универсальный рецепт автоматической дедукции» ([11], также [13]). Согласно этому рецепту, на первом шаге нужно выбрать какое-либо секвенциальное исчисление, предназначенное для построения выводов «снизу вверх», и построить на его основе исчисление обратного метода для вывода *замкнутых* формул в направлении «сверху вниз». Затем следует определить свойство подформульности и процедуру унификации, после чего перейти от исчисления для вывода замкнутых формул к полноценному исчислению для вывода произвольных формул.

В качестве базового интуиционистского исчисления в [13] взято исчисление $G3$ из [5], в котором выводимые секвенции могут иметь не более одной формулы в сукцеденте. Мы выбрали в качестве базового многосукцедентное исчисление $m-G3i$ из [25], представляющее собой модификацию исчисления $GNPC$, предложенного А.Г. Драгиным [3].

В данной статье для экономии места мы опускаем изложение промежуточного исчисления для замкнутых формул. Его нетрудно восстановить из приведенного ниже исчисления $m-G3i-inv$.

Пусть F — *ректифицированная* формула интуиционистской логики первого порядка, доказательство которой требуется вывести. Исчисление обратного метода строится индивидуально для формулы F таким образом, чтобы в доказательстве участвовали только подформулы F .

Выводимые объекты исчисления — это *секвенции с подстановками*:

$$A_1 \circ \theta_1, \dots, A_n \circ \theta_n \vdash B_1 \circ \sigma_1, \dots, B_m \circ \sigma_m,$$

где A_i ($i = 1..n$) — отрицательные свободные подформулы F ; B_i ($i = 1..m$) — положительные свободные подформулы F ; θ_i ($i = 1..n$) и σ_i ($i = 1..m$) — подстановки; символ « $\circ$ » обозначает операцию применения подстанов-

ки. Секвенции с подстановками определяются однозначно с точностью до порядка следования формул и могут содержать повторяющиеся элементы.

На рис. 1 представлены правила вывода (включая аксиомы) исчисления $m\text{-}G3i\text{-}inv$. Во всех правилах посылки и заключения являются секвенциями с подстановками. В Px каждый из символов P и Q обозначает атомарную подформулу формулы F или подформулу, являющуюся логической константой $\perp$; подстановка ρ переименовывает в P переменные, совпадающие с переменными из Q ; подстановка θ — наиболее общий унификатор формул $P\rho$ и Q . Во всех правилах посылки не имеют общих переменных как друг с другом, так и с множеством переменных формулы F . Подстановка θ — наиболее общий унификатор подстановок σ_1 и σ_2 . Γ и Δ — произвольные последовательности формул, возможно пустые. В правилах $L\exists$ и $R\forall$ должно выполняться *ограничение на собственную переменную*: $x\sigma$ — это переменная, которая не входит

свободно в заключение правил.

Кроме приведенных правил, в исчислении действует неявное правило переименования, разрешающее переименовывать переменные в секвенциях.

Теорема. Полнота исчисления $m\text{-}G3i\text{-}inv$. Пусть F — замкнутая ректифицированная формула интуиционистской логики. Секвенция $\vdash F \circ \varepsilon$ выводима в исчислении $m\text{-}G3i\text{-}inv$ тогда и только тогда, когда секвенция $\vdash F$ выводима в исчислении $GHPC$.

При доказательстве теоремы могут быть использованы идеи из [13], где дано доказательство полноты односукцедентного исчисления для вывода формул интуиционистской логики. Отметим, что полнота исчисления $GHPC$ доказана в [3].

Полученное нами исчисление отличается от интуиционистского исчисления из [13] и от ряда других, встречающихся в публикациях по обратному методу [17, 23], следующим:

- исчисление $m\text{-}G3i\text{-}inv$ является многосукцедентным, что позволяет сократить

Px	$P \circ \rho \theta \vdash Q \circ \theta$	$L \perp$	$\perp \vdash$
LC	$\frac{\Gamma, A \circ \sigma_1, A \circ \sigma_2 \vdash \Delta}{\Gamma \theta, A \circ \sigma_1 \theta \vdash \Delta \theta}$	RC	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, A \circ \sigma_1, A \circ \sigma_2}{\Gamma \theta \vdash \Delta \theta, A \circ \sigma_1 \theta}$
$L \wedge_1$	$\frac{\Gamma, A \circ \sigma \vdash \Delta}{\Gamma, A \wedge B \circ \sigma \vdash \Delta}$	$L \wedge_2$	$\frac{\Gamma, B \circ \sigma \vdash \Delta}{\Gamma, A \wedge B \circ \sigma \vdash \Delta}$
$R \wedge$	$\frac{\Gamma_1 \vdash \Delta_1, A \circ \sigma_1 \quad \Gamma_2 \vdash \Delta_2, B \circ \sigma_2}{\Gamma_1 \theta, \Gamma_2 \theta \vdash \Delta_1 \theta, \Delta_2 \theta, A \wedge B \circ \sigma_1 \theta}$	$L \vee$	$\frac{\Gamma_1, A \circ \sigma_1 \vdash \Delta_1 \quad \Gamma_2, B \circ \sigma_2 \vdash \Delta_2}{\Gamma_1 \theta, \Gamma_2 \theta, A \vee B \circ \sigma_1 \theta \vdash \Delta_1 \theta, \Delta_2 \theta}$
$R \vee_1$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, A \circ \sigma}{\Gamma \vdash \Delta, A \vee B \circ \sigma}$	$R \vee_2$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, B \circ \sigma}{\Gamma \vdash \Delta, A \vee B \circ \sigma}$
$L \supset$	$\frac{\Gamma_1 \vdash \Delta_1, A \circ \sigma_1 \quad \Gamma_2, B \circ \sigma_2 \vdash \Delta_2}{\Gamma_1 \theta, \Gamma_2 \theta, A \supset B \circ \sigma_1 \theta \vdash \Delta_1 \theta, \Delta_2 \theta}$	$R \supset_2$	$\frac{\Gamma, A \circ \sigma \vdash}{\Gamma \vdash A \supset B \circ \sigma}$
$R \supset_1$	$\frac{\Gamma \vdash B \circ \sigma}{\Gamma \vdash A \supset B \circ \sigma}$	$R \supset_3$	$\frac{\Gamma, A \circ \sigma_1 \vdash A \supset B \circ \sigma_2}{\Gamma \theta \vdash A \supset B \circ \sigma_2 \theta}$
$L \forall$	$\frac{\Gamma, A \circ \sigma \vdash \Delta}{\Gamma, \forall x A \circ \sigma_{-x} \vdash \Delta}$	$R \forall$	$\frac{\Gamma \vdash A \circ \sigma}{\Gamma \vdash \forall x A \circ \sigma_{-x}}$
$L \exists$	$\frac{\Gamma, A \circ \sigma \vdash \Delta}{\Gamma, \exists x A \circ \sigma_{-x} \vdash \Delta}$	$R \exists$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, A \circ \sigma}{\Gamma \vdash \Delta, \exists x A \circ \sigma_{-x}}$

Рис. 1. Исчисление $m\text{-}G3i\text{-}inv$



число правил вывода;

- в исчислении используется логическая константа $\perp$, а не связка $\neg$, отрицание при этом определяется через импликацию: $\neg A \equiv A \supset \perp$.

Стратегии оптимизации для полученного исчисления. Для разработки эффективного алгоритма автоматического логического вывода одного исчисления недостаточно: необходимо дополнить его стратегиями оптимизации, позволяющими уменьшить размер дерева вывода.

Как было отмечено ранее в обзоре, в [27] А. Воронков сформулировал общие условия к нескольким стратегиям для обратного метода, но не разработал стратегии для интуиционистской логики. Данный раздел посвящен изложению стратегий, адаптированных к интуиционистскому исчислению $m\text{-}G3i\text{-}inv$.

Большинство стратегий используют отношение поглощения на множестве секвенций, позволяющее определить, какие секвенции являются более общими по сравнению с другими.

Определение. *Отношение поглощения $\prec_I$.* В исчислении $m\text{-}G3i\text{-}inv$ секвенция с подстановками $S' = \Gamma' \vdash \Delta'$ поглощает секвенцию с подстановками $S = \Gamma \vdash \Delta$ (пишется $S \prec_I S'$) тогда и только тогда, когда существует подстановка τ такая, что

1) для каждой формулы $\varphi' \circ \sigma' \in S'$ найдется такая формула $\varphi \circ \sigma \in S$, что φ является (свободной) подформулой φ' и $(\sigma' \circ \tau)|_{free(\varphi')} \equiv \sigma|_{free(\varphi)}$ (назовем формулу $\varphi \circ \sigma$ *конкретизирующим образом* формулы $\varphi' \circ \sigma'$ в секвенции S);

2) для каждой пары формул $\Phi'_1 = \varphi' \circ \sigma'_1$ и $\Phi'_2 = \varphi' \circ \sigma'_2$ из секвенции S' соответствующие им конкретизирующие образы в секвенции S различны;

3) если $\varphi' \circ \sigma' \in \Delta'$, то соответствующий ей конкретизирующий образ $\varphi \circ \sigma \in \Delta$ и выполняется хотя бы одно из условий:

1. $\varphi = \varphi'$ или формула φ не имеет вид $A \supset B$;
2. не существует формулы φ'' вида $A \supset B$ или $\forall x A$ такой, что $\varphi \neq \varphi''$, φ является свободной подформулой φ'' , φ'' является свободной подформулой φ' ;
3. Секвенция S не имеет вид $\perp \vdash$.

Адаптированная стратегия поглощения секвенций (subsumption) определяется так: разрешается удалять из пространства поиска вывода секвенцию S , если уже выведена такая секвенция S' , что $S \prec_I S'$.

Приведенное выше отношение поглощения является более общим по сравнению с формулировками, предложенными в [17, 18, 23], поэтому позволяет устранять больше избыточных секвенций.

Основное отличие отношения $\prec_I$ от отношения $\prec_c$ для классической логики, предложенного в [27], заключается в дополнительных ограничениях 2 и 3 (см. определение выше). Учитывая это различие, на основе стратегий для классической логики из [27] можно сформулировать адаптированные стратегии оптимизации для исчисления $m\text{-}G3i\text{-}inv$:

1) стратегия упрощения немаксимальных секвенций;

2) стратегия удаления «бесполезных» (useless) секвенций, основанная на множестве U_1 из [27].

Также в данной работе мы используем следующую стратегию: если в секвенции встречаются подстановки, в которых различные собственные переменные (т. е. такие, которые участвуют в правилах $L\exists$ и $R\forall$) заменяются на одну и ту же переменную, то такую секвенцию можно удалить. Соответствующее данной стратегии множество бесполезных секвенций назовем множеством U_3 , и тем же символом обозначим саму стратегию. Стратегия U_3 является ослаблением стратегии использования допустимых наборов и удаления недопустимых (см. [2, 6, 7]), при этом позволяет устранить достаточное число избыточных секвенций при экономных затратах ресурсов (памяти и времени).

Полезно также оптимизировать правила сокращения LC и RC : применять их неявно к каждой вновь порожденной секвенции, а в случае их обратимости замещать исходную секвенцию ее сокращенным вариантом. Эта оптимизация не является принципиально новой, похожие идеи есть в [23].

Все используемые в работе стратегии оптимизации являются совместимыми, поскольку согласуются с отношением по-

глошения $\prec_I$. Для доказательства полноты стратегий достаточно показать, что они удовлетворяют соответствующим общим определениям из [27].

Экспериментальная программа для автоматического доказательства теорем в интуиционистской логике первого порядка

Мы расширили разработанную ранее систему АДТ для классической логики предикатов [20, 21], добавив возможность доказывать формулы интуиционистской логики в исчислении *m-G3i-inv*. Разработанная система АДТ называется WhaleProver (whale — кит). Программа разработана с применением объектно-ориентированного подхода на языке C++.

В программе используется адаптированный вариант алгоритма, называемого в англоязычной литературе Otter loop или given clause algorithm [16], и используемый в современных резольвтивных системах АДТ, таких как Prover9 (ранее Otter) и E. Согласно этому алгоритму, все участвующие в доказательстве секвенции делятся на два списка: активные секвенции и использованные секвенции.

Полный алгоритм логического вывода, реализованный в программе, включает в себя несколько основных шагов.

1. Переменные в исходной замкнутой формуле переименовываются так, чтобы все кванторы связывали разные переменные. Устраняются кванторы, связывающие неиспользуемые переменные. Получается «ректифицированная» формула F .

2. Порождаются все возможные аксиомы исчисления и помещаются в конец списка активных секвенций.

3. Каждая активная секвенция «упрощается», т. е. к ней применяются все приведенные в предыдущем разделе стратегии оптимизации.

4. Из активного списка выбирается секвенция. Если она не поглощается никакой из использованных секвенций, выполняется шаг 5. Иначе секвенция удаляется, и шаг 4 повторяется. Если список пуст, алгоритм завершает работу и выдает результат: «формула не является теоремой».

5. Выбранная секвенция переносится в

список использованных секвенций. Применяются все правила вывода, в которых хотя бы одна из посылок совпадает с выбранной секвенцией.

6. Каждая порожденная на шаге 5 секвенция «упрощается» (см. шаг 3), оставшиеся секвенции помещаются в конец активного списка.

7. Если среди вновь выведенных секвенций встречается $\vdash F$, алгоритм завершает работу с результатом «формула является теоремой», при этом вывод формулы F восстанавливается в обратном порядке. В противном случае алгоритм возвращается к шагу 4.

Был проведен ряд экспериментов с разработанной АДТ WhaleProver на задачах из библиотеки ILTP [22] версии 1.1.2. Всего в библиотеке 2550 задач, из которых 1787 пока не решены. Эксперименты проводились на компьютере с процессором Intel Core 2 Duo 2.67 ГГц, ОС Windows 7 и 3 Гб ОЗУ.

На репрезентативной выборке из 253 задач различной сложности были проведены эксперименты по сравнению стратегий оптимизации для обратного метода. Эффективность стратегий определялась по критериям:

1) средний размер пространства поиска вывода (объем используемой памяти может считаться пропорциональным этому параметру);

2) среднее время доказательства;

3) средняя длина доказательства;

4) средняя глубина вывода.

Результаты экспериментов показали, что по основным критериям 1 и 2 эффективность адаптированной стратегии поглощения более чем в два раза превосходит эффективность стратегий поглощения из работ [17, 18, 23].

Использование адаптированной стратегии упрощения немаксимальных секвенций совместно со стратегией поглощения позволяет увеличить эффективность по всем критериям в четыре раза и более, по сравнению с использованием только стратегии поглощения. В тех же условиях оптимизация правил сокращения позволяет получить выигрыш по критериям 1 и 2

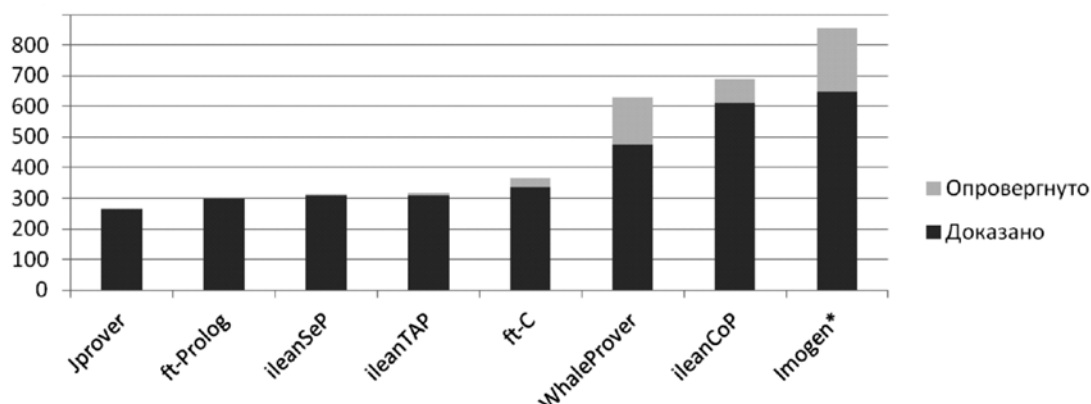


Рис. 2. Сравнение количества решенных задач системами АДТ

примерно в 1,5 раза. Стратегия U_3 позволяет сэкономить в среднем 15 % памяти и времени, а на ряде задач дает выигрыш в несколько раз. При этом адаптированная стратегия удаления бесполезных секвенций не оказывает значительного влияния на оцениваемые показатели.

На рис. 2 приведены результаты сравнения на задачах из ILTP системы АДТ WhaleProver с лучшими системами АДТ для интуиционистской логики первого порядка. При тестировании нашей программы на каждую задачу был выделен лимит времени 100 с. Другие системы АДТ тестировались на отличных конфигурациях компьютеров (см. подробнее [17, 24]) и с лимитом времени 600 с. Несмотря на эти различия, рис. 2 демонстрирует качественный уровень разработанной системы АДТ.

Для всех систем, кроме Imogen*, на сайте ILTP [24] имеется детальная информа-

ция по решенным ими задачам. В таблице приведено подробное сравнение результатов системы АДТ WhaleProver с этими системами.

В таблице нижние четыре строки содержат количество решенных задач в областях: KRS — представление знаний, NLP — обработка естественного языка, SWV — верификация ПО, GEJ — конструктивная геометрия Яна вон Плато. В трех из них программа WhaleProver решила больше задач, чем другие системы АДТ. В доменах KRS и NLP программа решила соответственно 24 и 36 задач, которые другие программы решить не смогли. Кроме того, система АДТ WhaleProver смогла опровергнуть значительно больше ложных утверждений. В целом разработанная система решила 94 задачи, которые не были решены до этого ни одной системой из ILTP.

Детальные результаты сравнения систем АДТ

	JProver	ft-Prolog	ft-C	ileanSeP	ileanTAP	ileanCoP	WhaleProver
Решено задач	268	299	364	313	315	690	628
Доказано	264	299	334	309	311	610	476
Опровергнуто	4	0	30	4	4	80	152
Решено задач (таймаут 100 с)	262	295	364	301	312	647	628
KRS	33	26	26	18	19	42	58
NLP	7	7	7	3	11	3	42
SWV	1	48	48	82	49	132	57
GEJ	5	13	15	9	11	70	73

В данной статье мы рассмотрели один из методов автоматического доказательства теорем — обратный метод Маслова. В статье сделан обзор ключевых работ по обратному методу, сформулировано оригинальное исчисление обратного метода для интуиционистской логики первого порядка. Предложены адаптированные стратегии оптимизации для этого исчисления. Описан алгоритм доказательства теорем в полученном исчислении и разработанная на его основе система АДТ WhaleProver.

В соответствии с признанными мировыми практиками проведена апробация разработанной системы АДТ на задачах из библиотеки ИЛТР. Приведены результаты сравнения стратегий оптимизации, а также сравнения с существующими системами АДТ. Приведенные данные демонстрируют важный результат: система АДТ на базе обратного метода при использовании под-

ходящих стратегий оптимизации позволяет расширить границы применения систем АДТ для интуиционистской логики. Для ряда задач система АДТ WhaleProver позволяет значительно сократить время доказательства. Программа решила почти 100 задач, не поддающихся решению других систем АДТ для интуиционистской логики за разумное время. Особенно много новых результатов относится к конструктивной геометрии и таким областям искусственного интеллекта, как представление знаний и обработка естественного языка.

Все сказанное выше позволяет рекомендовать разработанную систему АДТ в дополнение к уже существующим системам АДТ для интуиционистской логики, для формализации конструктивных математических теорий и решения актуальных задач, возникающих в различных направлениях искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бет Э. Метод семантических таблиц // Математическая теория логического вывода. М.: Наука, 1967. С. 191–199.
2. Давыдов Г.В., Маслов С.Ю., Минц Г.Е., Ореков В.П., Слисенко А.О. Машинный алгоритм установления выводимости на основе обратного метода // Исследования по конструктивной математике и математической логике. Зап. науч. сем. ЛОМИ. 1969. Т. 16. С. 8–19.
3. Драгалин А.Г. Математический интуиционизм. Введение в теорию доказательств. М.: Наука, 1979.
4. Кангер С. Упрощенный метод доказательства для элементарной логики // Математическая теория логического вывода. М.: Наука, 1967. С. 200–207.
5. Клини С. Математическая логика. М.: Мир, 1973.
6. Маслов С.Ю. Обратный метод установления выводимости в классическом исчислении предикатов // ДАН СССР. 1964. Т. 159. № 1. С. 17–20.
7. Маслов С.Ю. Обратный метод установления выводимости для логических исчислений // Труды МИАН СССР. 1968. Т. 98. С. 26–87.
8. Маслов С.Ю. Тактики поиска вывода, основанные на унификации порядка членов в благоприятном наборе // Зап. науч. сем. ЛОМИ. 1969. Т. 16. С. 126–136.
9. Маслов С.Ю. Связь между тактиками обратного метода и метода резолюций // Зап. науч. сем. ЛОМИ. 1969. Т. 16. С. 137–146.
10. Маслов С.Ю. Обратный метод и тактики установления выводимости для исчисления с функциональными знаками // Труды МИАН СССР. 1972. Т. 121. С. 14–56.
11. Маслов С.Ю. О поиске вывода в исчислениях общего типа // Зап. науч. сем. ЛОМИ. 1972. Т. 32. С. 59–65.
12. Чень Ч., Ли Р. Математическая логика и автоматическое доказательство теорем. Пер. с англ. М.: Наука, 1983. 360 с.
13. Degtyarev A., Voronkov A. The inverse method // Handbook of Automated Reasoning. Elsevier, Amsterdam, 2001. Vol. 1. Pp. 179–272.
14. Hähnle R. Tableaux and Related Methods // Handbook of Automated Reasoning. Elsevier, Amsterdam, 2001. Vol. 1. Pp. 101–177.
15. Lifschitz V. What is the inverse method? // Journal of Automated Reasoning. 1989. No. 5(1). Pp. 1–23.
16. McCune W. Prover9 and Mace4 [электронный ресурс] URL: <http://www.cs.unm.edu/~mccune/Prover9>, 2005–2010. (дата обращения: 19.12.2015).
17. McLaughlin S., Pfenning F. Efficient Intuitionistic Theorem Proving with the Polarized Inverse Method // CADE-22. LNCS. Springer, Heidelberg, 2009. Vol. 5663. Pp. 230–244.
18. Mints G. Resolution strategies for the Intuitionistic Logic // Constraint Programming. NATO



ASI Series. Springer, Heidelberg, 1994. Vol. 131. Pp. 289–311.

19. **Mints G.** Decidability of the Class E by Maslov's Inverse Method. Essays Dedicated to Yuri Gurevich on the Occasion of His 70th Birthday // LNCS. Springer, Heidelberg, 2010. Vol. 6300. Pp. 529–537.

20. **Pavlov V., Schukin A., Cherkasova T.** Exploring Automated Reasoning in First-Order Logic: Tools, Techniques and Application Areas // 4th Internat. Conf. KESW 2013. CCIS. Springer, Heidelberg, 2013. Vol. 394. Pp. 102–116.

21. **Pavlov V., Pak V.** The Inverse Method and First-Order Logic Theorem Proving // Non-linear Dynamics and Applications. 2014. Vol. 20. Pp. 127–135.

22. **Raths T., Otten J., Kreitz C.** The ILTP Library: Benchmarking Theorem Provers for Intuitionistic Logic // Automated Reasoning with Ana-

lytic Tableaux and Related Methods. TABLEUX 2005. LNAI. Springer Verlag, 2005. Vol. 3702. Pp. 333–337.

23. **Tammet T.** A resolution theorem prover for intuitionistic logic // CADE-13. LNCS. Springer, Heidelberg, 1996. Vol. 1104. Pp. 2–16.

24. The ILTP Library. Provers and Results [электронный ресурс] / URL: <http://www.cs.uni-potsdam.de/ti/iltp/results.html>. (дата обращения: 19.12.2015).

25. **Troelstra A.S., Schwichtenberg H.** Basic Proof Theory. Cambridge University Press, 2000.

26. **Voronkov A.A.** Liss – the logic inference search system // Proceedings. LNCS. Springer, Heidelberg, 1990. Vol. 449. Pp. 677–678.

27. **Voronkov A.** Theorem proving in non-standard logics based on the inverse method // CADE-11. LNCS. Springer, Heidelberg, 1992. Vol. 607. Pp. 648–662.

REFERENCES

1. **Beth E.** Metod semanticheskikh tablits [The method of semantic tables]. *Matematicheskaya teoriya logicheskogo vyvoda* [The mathematical theory of inference]. Moscow: Nauka Publ., 1967, Pp. 191–199. (rus)

2. **Davydov G.V., Maslov S.Yu., Mints G.E., Orevkov V.P., Slisenko A.O.** Mashinnyy algoritm ustanovleniya vyvodimosti na osnove obratnogo metoda [Machine algorithm for establishing deducibility based on the inverse method]. *Issledovaniya po konstruktivnoy matematike i matematicheskoy logike. Zap. nauchn. sem. LOMI*, 1969, Vol. 16, Pp. 8–19. (rus)

3. **Dragalin A.G.** *Matematicheskiy intuizionizm. Vvedeniye v teoriyu dokazatelstv.* [Mathematical intuitionism. Introduction to the theory of evidence], Moscow: Nauka Publ., 1979. (rus)

4. **Kanger S.** Uproshchennyy metod dokazatelstva dlya elementarnoy logiki [Simplified method of proof for elementary logic]. *Matematicheskaya teoriya logicheskogo vyvoda* [The mathematical theory of inference]. Moscow: Nauka Publ., 1967, Pp. 200–207. (rus)

5. **Kleene S.** *Matematicheskaya logika* [Mathematical logic]. Moscow: Mir Publ., 1973. (rus)

6. **Maslov S.Yu.** Obratnyy metod ustanovleniya vyvodimosti v klassicheskom ischislenii predikatov [The inverse method for the classical predicate calculus]. *DAN SSSR*, 1964, Vol. 159, No. 1, Pp. 17–20. (rus)

7. **Maslov S.Yu.** Obratnyy metod ustanovleniya vyvodimosti dlya logicheskikh ischisleniy [The inverse method for establishing deducibility for logical calculus]. *Tr. MIAN SSSR*, 1968, Vol. 98,

Pp. 26–87. (rus)

8. **Maslov S.Yu.** Taktiki poiska vyvoda, osnovannyye na unifikatsii poryadka chlenov v blagopriyatnom nabore [Deduction search tactics based on the unification of the order of members in favorable sets]. *Zap. nauchn. sem. LOMI*, 1969, Vol. 16, Pp. 126–136. (rus)

9. **Maslov S.Yu.** Svyaz mezhdu taktikami obratnogo metoda i metoda rezolyutsiy [A connection between tactics of the inverse method and the resolution method]. *Zap. nauchn. sem. LOMI*, 1969, Vol. 16, Pp. 137–146. (rus)

10. **Maslov S.Yu.** Obratnyy metod i taktiki ustanovleniya vyvodimosti dlya ischisleniya s funktsionalnymi znakami [The inverse method, and tactics for establishing deducibility for a calculus with functional signs]. *Tr. MIAN SSSR*, 1972, Vol. 121, Pp. 14–56. (rus)

11. **Maslov S.Yu.** O poiske vyvoda v ischisleniyakh obshchego tipa [The search for a deduction in the general type]. *Zap. nauchn. sem. LOMI*, 1972, Vol. 32, Pp. 59–65. (rus)

12. **Chang C., Lee R.** *Matematicheskaya logika i avtomaticheskoye dokazatelstvo teorem* [Mathematical logic and automated theorem proving]. Moscow: Nauka Publ., 1983, 360 p. (rus)

13. **Degtyarev A., Voronkov A.** The inverse method. *Handbook of Automated Reasoning*, Elsevier, Amsterdam, 2001, Vol. 1, Pp. 179–272.

14. **Hähnle R.** Tableaux and Related Methods. *Handbook of Automated Reasoning*, Elsevier, Amsterdam, 2001, Vol. 1, Pp. 101–177.

15. **Lifschitz V.** What is the inverse method? *Journal of Automated Reasoning*, 1989, No. 5(1), Pp. 1–23.

16. **McCune W.** *Prover9 and Mace4*. Available: <http://www.cs.unm.edu/~mccune/Prover9>, 2005–2010 (Accessed: 19.12.2015).
17. **McLaughlin S., Pfenning F.** Efficient Intuitionistic Theorem Proving with the Polarized Inverse Method. *CADE-22. LNCS*, Springer, Heidelberg, 2009, Vol. 5663, Pp. 230–244.
18. **Mints G.** Resolution strategies for the Intuitionistic Logic. *Constraint Programming. NATO ASI Series*. Springer, Heidelberg, 1994, Vol. 131, Pp. 289–311.
19. **Mints G.** Decidability of the Class E by Maslov's Inverse Method. Essays Dedicated to Yuri Gurevich on the Occasion of His 70th Birthday. *LNCS*, Springer, Heidelberg, 2010, Vol. 6300, Pp. 529–537.
20. **Pavlov V., Schukin A., Cherkasova T.** Exploring Automated Reasoning in First-Order Logic: Tools, Techniques and Application Areas. *4th International Conference, KESW 2013. CCIS*, Springer, Heidelberg, 2013, Vol. 394, Pp. 102–116.
21. **Pavlov V., Pak V.** The Inverse Method and First-Order Logic Theorem Proving. *Non-linear Dynamics and Applications*, 2014, Vol. 20, Pp. 127–135.
22. **Raths T., Otten J., Kreitz C.** The ILTP Library: Benchmarking Theorem Provers for Intuitionistic Logic. *Automated Reasoning with Analytic Tableaux and Related Methods, TABLEUX 2005, LNAI*, Springer Verlag, 2005, Vol. 3702, Pp. 333–337.
23. **Tammet T.** A resolution theorem prover for intuitionistic logic. *CADE-13. LNCS*, Springer, Heidelberg, 1996, Vol. 1104, Pp. 2–16.
24. **The ILTP Library. Provers and Results.** Available: <http://www.cs.uni-potsdam.de/ti/iltp/results.html> (Accessed: 19.12.2015).
25. **Troelstra A.S., Schwichtenberg H.** *Basic Proof Theory*. Cambridge University Press, 2000.
26. **Voronkov A.A.** Liss – the logic inference search system. *Proceedings. LNCS*, Springer, Heidelberg, 1990, Vol. 449, Pp. 677–678.
27. **Voronkov A.** Theorem proving in non-standard logics based on the inverse method. *CADE-11. LNCS*. Springer, Heidelberg, 1992, Vol. 607, Pp. 648–662.

ПАВЛОВ Владимир Александрович — аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vlapav239@gmail.com

PAVLOV Vladimir A. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: vlapav239@gmail.com

ПАК Вадим Геннадьевич — доцент кафедры компьютерных интеллектуальных технологий Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vadimpak917@gmail.com

PAK Vadim G. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: vadimpak917@gmail.com



Инфокоммуникационные технологии в образовании

DOI: 10.5862/JCSTCS.234.8

УДК 331.101.6

С.С. Колосков, В.Н. Бабешко, А.В. Самочадин

КЛЮЧЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ MDM И BYOD

S.S. Koloskov, V.N. Babeshko, A.V. Samochadin

PRIMARY INDICATORS OF EFFICIENCY IN THE MANAGEMENT OF EDUCATIONAL INSTITUTIONS USING THE MDM AND THE BYOD TECHNOLOGIES

Рассмотрены вопросы повышения эффективности вузов за счет применения технологий Bring Your Own Device (BYOD) и управления мобильными устройствами. Выявлены отдельные показатели эффективности (KPI), включая показатели удовлетворенности пользователей вуза: скорость и производительность сервисов (авторизации и проч.), обеспечение высокого уровня доступности и устойчивости при управлении непредсказуемым трафиком, задержки установления сессий и обрывы связи, качество обслуживания пользователей ИТ-подразделением; снижение затрат на масштабирование университетской сети посредством использования существующих средств контроля доступа для реализации политик безопасности на новых сетевых устройствах уровня доступа; снижение затрат на организацию сетей передачи данных для вспомогательных систем (например, систем видеосвязи), для чего необходимо подключение компонентов указанных систем в общую сеть передачи данных; снижение издержек при реализации угроз информационной безопасности по отношению к объектам корпоративной сети путем повышения оперативности принятия управленческих решений администраторами информационной безопасности за счет централизации механизмов управления политиками безопасности сети, а также консолидации сведений о субъектах и событиях доступа.

Изучены вопросы повышения престижа вуза за счет внедрения BYOD и экономический эффект от использования технологии BYOD в вузах и в бизнес-компаниях при вузах. Разработанная система показателей эффективности при использовании MDM и BYOD в настоящее время проходит апробацию в рамках внедрения системы централизованного управления мобильными устройствами, проводимого в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого и Белгородском государственном технологическом университете имени В.Г. Шухова в ходе реализации комплексного проекта «Создание российского аналога системного программного обеспечения для централизованного управления персональными мобильными устройствами и платформами в корпоративных сетях» в рамках Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218.

МОБИЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ; ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ BYOD В ВУЗАХ; ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ BYOD В УПРАВЛЕНИИ ВУЗА; ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И УДОВЛЕТВОРЕННОСТЬ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ; ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ВУЗА.

In the present paper, we have studied the issues of mobile device management in universities and the issues of increasing university efficiency using the «Bring Your Own Device» (BYOD) technologies. We

have outlined the key indicators that include the level of satisfaction with the mobile device management services: efficiency, accessibility, sustainability in the management of unpredictable traffic, frequency of disconnections, delays in setting up sessions, quality of service. Other indicators that are closely studied in the paper have economic origins. The first indicator is the reduction of the cost of scaling the campus network using existing access control tools (to realize the security policy on new network devices). The second economic indicator is connected to the reduction of the cost of organizing data networks for auxiliary university systems (e.g. video conferencing systems). Such a reduction implies that the components of the specified systems are connected to the main data transmission network. The last economic indicator discussed is the reduction of the cost of information security threats with respect to the components of the corporate network. This reduction can be achieved by decreasing the decision-making time (by centralizing the mechanisms for managing the corporate network security policies) and by consolidating the information on accessing subjects and access events.

We have also studied the ways of improving a university's reputation using BYOD and the economical effects of BYOD's use in universities and small companies created by university research teams and students. The developed system of indicators is currently beta-tested as a system for managing a university's mobile device infrastructure is being introduced at Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University and at Belgorod State Technological University. The testing is conducted as a part of the project «Development of a Russian analogue of system software for the centralized management of personal mobile devices and platforms in corporate networks» under the Resolution of the Government of the Russian Federation No 218 of April 9, 2010.

BYOD; ECONOMIC EFFECT OF BYOD IN HIGHER EDUCATION; PERFORMANCE INDICATORS USING BYOD; PRODUCTIVITY AND USER SATISFACTION; PRODUCTIVITY OF ENTERPRISES.

Интересы современного вуза претерпевают постоянные изменения. Они требуют все новые векторы развития технических решений, заставляют меняться существующие формы организации бизнес-процессов вуза с целью максимизации конкурентной позиции на глобальном рынке образовательных услуг и программ. Задачи роста уровня конкурентоспособности каждого вуза на рынке неизбежно приводят к потребности перманентного активного развития его инфраструктуры, в том числе информационной. Развитие коммуникационных технологий и мобильных устройств существенным образом трансформирует подходы к организации образовательного пространства, инфраструктуры и деятельности участников образовательного процесса в вузах. Мобильность — это одна из важнейших составляющих современной модели вузовского образования.

По аналитической справке Gartner, переход на технологии BYOD (Bring Your Own Device — Принеси своё собственное устройство) может способствовать экономии до 40 % издержек компании на оснащение и техническое обслуживание рабочих мест сотрудников [3].

Применение в вузе технологий BYOD обеспечивает возможность экономии на техническом оснащении, программных средствах, инфраструктуре, а также содействует модернизации ИТ-приложений и системы ИТ-поддержки. Снижение затрат в том числе зависит от того, способен ли вуз вложиться в сотрудников при использовании мобильных решений. Цель данного исследования — поиск ключевых показателей эффективности при управлении образовательной организацией с применением технологии BYOD. Задачами являются рассмотрение затрат и выгод от внедрения этой технологии в вузе, выявление эффектов от использования образовательных мобильных технологий в отношении повышения конкурентоспособности вуза.

Рассмотрим основные затраты и выгоды от внедрения технологии BYOD в вузе.

Согласно исследованиям Gartner, 95 % образовательных организаций не запрещают студентам и преподавателям применять личные мобильные устройства во время работы и учебного процесса и подключать их различными способами к своей инфраструктуре [5]. При этом 84 % организаций так или иначе оказывают техническую под-

держку мобильных устройств, что, как правило, применяется без механизмов консолидированного и системного управления. При этом около 36 % организаций предлагают техническую и эксплуатационную поддержку мобильных устройств на рабочих местах при централизованном управлении мобильными устройствами [4].

В табл. 1 представлена информация по издержкам и экономии вуза в разрезе видов ресурсов при внедрении BYOD [11].

Образовательной организации необходимо решить задачи, связанные с управлением мобильными устройствами. Это могут быть как наиболее простые задачи, например, предоставление доступа к почтовым сервисам и календарям с устройств, так и более сложные, связанные с комплексным сбором данных и обеспечением доступа к

управлению бизнес-процессами.

Из бесспорных преимуществ использования BYOD можно назвать лучшую интеграцию задач каждого участника в личное время (например, баланс образовательного и личного времени студента) [19].

Как показывает опыт реализации первых проектов BYOD в ряде крупных российских вузов, существенный показатель эффективности таких систем достигается в первую очередь именно за счет автоматизации процессов обслуживания сравнительно большого количества пользователей, а также предоставления возможности использования ими принесенных с собой устройств (смартфонов, ноутбуков, планшетных компьютеров и пр.) [7]. Таким образом, достигается не только возможность оперативного предоставления доступа пользователям си-

Таблица 1

Издержки и экономия вуза при внедрении BYOD

Вид ресурсов	Альтернативные издержки	Экономия	Экспертные оценки снижения затрат, тыс. руб
Аппаратные средства	Субсидии на оборудование; страхование оборудования	Уменьшение затрат на аппаратное обеспечение	От 10 до 20 в год на одно рабочее место
Программное обеспечение	Права на использование, операционная система, антивирусное программное обеспечение	Уменьшение стоимости работы сотрудников при использовании данных	От 0,5 в год на одного пользователя
Инфраструктура и модернизация	Инструменты безопасности, инструменты управления мобильными устройствами, переход на облачную платформу/Browser-платформу / независимые от платформы приложения	Уменьшение затрат на замену оборудования и обновление ПО	От 10 в год на одного пользователя для вузов с численностью студентов от 3000 человек
ИТ-поддержка	Изменение переходов для поддержки нескольких устройств и платформ, обучение сотрудников	Уменьшение стоимости технической поддержки, формирование собственной технической поддержки	От 0,5 в год на одного пользователя

стемы, но и сокращение, а затем и полное исключение издержек на закупку и обслуживание абонентского оборудования. Экономическая эффективность BYOD достигается за счет следующих позиций [14]:

- общего снижения затрат на работу службы технической поддержки путем автоматизации процессов предоставления доступа пользователям, процессов аутентификации и саморегистрации пользователей;
- масштабирования вузовской сети посредством использования существующих средств контроля доступа для реализации политик безопасности на новых сетевых устройствах уровня доступа (коммутаторы, контроллеры беспроводного доступа, VPN-шлюзы);
- понижения издержек на организацию сетей передачи данных для систем видеосвязи, сигнализации, отопления, кондиционирования, пожаротушения, бесперебойного электропитания;
- снятия издержек при реализации угроз информационной безопасности по отношению к объектам университетской сети путем повышения оперативности принятия управленческих решений администраторами информационной безопасности за счет централизации механизмов управления политиками безопасности сети, а также консолидации сведений о субъектах и событиях доступа.

У систем управления мобильными устройствами есть возможность масштабирования. С каждым новым устройством система становится все более дешевой. Технология может распространиться от телефонов к карманным персональным компьютерам и существующим компьютерным сетям в образовании, а также к электронным книгам в электронном обучении. Образовательная организация в сотрудничестве с другими организациями может предложить целую программу с отдельными сетевыми курсами, даже не создавая или не развивая единственный курс. Также стоит отметить, что фактором, положительно повлиявшим на технологическую эффективность ИТ-инфраструктуры при реализации BYOD в вузе, является повышение оперативности принятия управленческих решений в вузе. Это достигается преимущественно за счет повышения доступности вузовских информационных ресурсов для ректора и управленческого корпуса [22]. На рис. 1 представлена пирамида «Эффекты/риски» при внедрении BYOD в вузе.

Первый и один из самых главных вопросов вуза при внедрении BYOD-системы связан с обеспечением требуемого уровня информационной безопасности при реализации BYOD и менеджера устройств. На сегодняшний день главным противодействием массового распространения BYOD



Рис. 1. Пирамида «Эффекты/риски» при внедрении BYOD в вузе



являются именно проблемы информационной безопасности. Обеспечение защиты данных об учебно-научной деятельности — одна из ключевых причин успеха деятельности любого вуза. Результатом изменений в ИТ-инфраструктуре может стать возникновение новых и обновление уже существующих угроз безопасности вуза.

Создание ИТ-инфраструктуры вуза на базе новых информационных решений в рамках BYOD вызывает необходимость поиска путей решения возникших проблем безопасности информации [9]. Как развивать ИТ-инфраструктуру, не снизив при этом уровень информационной безопасности вуза в целом, — важный вопрос. Не будут ли с формированием списков новых угроз издержки на модернизацию системы защиты информационной безопасности противостоят эффективности ИТ-инфраструктуры вуза? Потеря сотрудниками мобильных устройств или захват отправляемой с них конфиденциальной информации — частые примеры ситуаций, которые при внедрении BYOD приводят к новым угрозам или росту рисков информационной безопасности. Важность системного эффективного управления доступом сотрудников, студентов и преподавателей, фиксирования утечек корпоративной информации с утерянных устройств — только некоторые из основных проблем, с которыми так или иначе предстоит столкнуться ИТ-директорам при переходе к BYOD.

При переходе от обычных способов пользования устройств вуза к BYOD смещается так называемая «граница доверия». В таких случаях она отчетливо пересекает «границу доступности» пользователям вуза. Существует ряд требований к ИТ-инфраструктуре вуза, на основании которых предлагается включение в общую сеть нового мобильного устройства [10]. Регулировать доступ к устройствам, не имея возможности применять к ним политики информационной устойчивости и контролировать исполнение таковых, в современном мире нельзя. Например, повышается вероятность дискредитации мобильных устройств пользователей, применяющихся за рамками зоны контроля (вне университетского кампуса).

Появляется возможность оттока конфиденциальной информации из-за утраты личных мобильных устройств. Как современный подход, функционал BYOD в составе ИТ-инфраструктуры любого крупного вуза по большей части требует редактирования и обновления содержания документов, регулирующих актуальные политики безопасности [6].

Не самым очевидным образом можно определить нематериальные затраты и выгоды при адаптации BYOD в вузе. Среди затрат могут быть разногласия с ИТ-службой из-за снижения уровня информационной устойчивости, сопротивление части студентов и преподавателей, прочие негативные последствия, связанные с процессом изменений. Среди выгод могут оказаться повышение мобильности и отлаженности работы вуза, оптимизация работы и баланса частной жизни, повышение престижа вуза, а также сокращение времени ответа и реагирования на запросы студентов и преподавателей. В табл. 2 в общем виде приведены возможные затраты и выгоды при внедрении BYOD в вузе в разрезе типа ресурсов (материальные и нематериальные) [12–14, 21].

Преимущества BYOD для вуза намного существенней, чем недостатки. Вопрос лишь в правильно организованном процессе и соблюдении политик безопасности. Обеспечить безопасность работы можно двумя путями. Первый — это защита корпоративной сети, к которой подключается мобильное устройство. Для этого используются технология NAC, VPN-клиенты на мобильных устройствах, средства предотвращения вторжений, системы контентной фильтрации и межсетевые экраны. Устройство может быть взломано или утеряно, но это не создаст никакой угрозы для безопасности корпоративной сети и хранящейся в ней информации. Второй вариант — защита самого гаджета отдельными средствами защиты, либо комплексными решениями, управления мобильными устройствами (Mobile Device Management — MDM). MDM-серверы попутно решают и задачу централизованного управления [7]. С их помощью можно полностью исклю-

Таблица 2

Затраты и выгоды при внедрении BYOD в вузе в разрезе типа ресурсов

	Затраты на внедрение BYOD	Выгоды от внедрения BYOD
Материальные	Приобретение, внедрение и поддержка систем MDM; разработка и сопровождение мобильных приложений; переобучение и дополнительная оплата труда ИТ-специалистов; компенсационные выплаты сотрудникам за амортизацию собственных гаджетов	Повышение скорости реакции менеджмента на различные процессы; своевременная выработка корректирующих воздействий; ускорение бизнес-процессов за счет более плотной вовлеченности всех пользователей; увеличение фактического неоплачиваемого времени работы сотрудников
Нематериальные	Негативная позиция службы безопасности из-за понижения уровня информационной безопасности (действительного или воспринимаемого); сопротивление части пользователей; прочие негативные последствия, связанные с процессом перемен	Повышение гибкости и отлаженности работы системы; оптимизация баланса работы и частной жизни сотрудников вуза и студентов; сокращение времени реагирования на запросы студентов; повышение престижа вуза

читать все недостатки концепции BYOD и в полной мере воспользоваться ее достоинствами. Одним из главных преимуществ внедрения BYOD является возможность увеличить производительность преподавателей и сотрудников как с точки зрения итоговых результатов, так и в плане эффективности взаимодействий. Это очень важно, поскольку одним из первоначальных аргументов против внедрения BYOD были опасения, что личные приложения и контент будут отвлекать от работы. Поэтому в лучшем случае BYOD должен обеспечить оптимизацию затрат на развитие и эксплуатацию ИТ-инфраструктуры вуза; возможность сосредоточиться на задачах развития вуза посредством управления делегированием задач и реализации сервисов, упрощающих учебно-научный процесс (например, мобильное расписание, мобильная библиотека) и ИТ-инфраструктура вуза надежно защищена [7, 8].

Рассмотрим основные эффекты от использования мобильных технологий в отношении повышения конкурентоспособности вуза.

Технологии централизованного управления мобильными устройствами (MDM) могут оказать существенное влияние на развитие информационной инфраструктуры вуза, являющейся одним из направлений развития в программах повышения конкурентоспособности ведущих университетов, способствовать повышению открытости и прозрачности процессов и информатизации деятельности вузов (на основе модели системы менеджмента качества международного стандарта ISO 9001 и рекомендаций Европейской ассоциации гарантий качества в высшем образовании (ENQA) в части информационной инфраструктуры).

«Мобильный университет», как составная часть «электронного университета» и неотъемлемый элемент современной информационной образовательной среды, оказывает влияние на развитие культуры корпоративного управления в вузе, повышает управляемость, оперативность управления и степень вовлеченности сотрудников и отдельных структур вуза в корпоративное управление, а также оказывает имиджевое влияние на привлечение талантливой мо-

Таблица 3

Показатели оценки вузов в международных рейтингах, на которые может повлиять использование мобильных технологий

Рейтинг	Критерий	Показатель
THE	Оценка преподавания и условия обучения	Репутационное исследование по вопросам преподавания / Reputation survey teaching (вес 15 % – доминирующий)
GUR	Социальные показатели	Уровень обеспеченности ресурсами / Facilities (вес 7,5 %). Социальная ответственность / Social Responsibility (включая доступность для инвалидов) Facilities (вес 7,5 %)

лодежи и иностранных студентов, мотивацию персонала и обучающихся [19].

Технологии централизованного управления мобильными устройствами выводят вузовские системы дистанционного обучения на новый технологический уровень, позволяя безопасно и централизованно управлять не только образовательным контентом, но и функционалом таких систем через экосистему собственных мобильных сервисов. Примерами использования мобильных сервисов вуза, помимо традиционных информационных и образовательных, могут служить [8, 19]:

электронное голосование для ежегодных конкурсов по направлениям исследований для студентов, аспирантов, стажеров и молодых научных работников;

фокусное информирование студентов и сотрудников через мобильные уведомления.

В табл. 3 представлены показатели оценки вузов в международных рейтингах, на которые может повлиять использование мобильных технологий.

Отдельно рассмотрим мировые тенденции применения BYOD в бизнес-компаниях при вузах.

В перспективе ближайших 2–3 лет концепция BYOD может быть востребована в вузах с большим количеством мобильных сотрудников. То есть, использующих при работе мобильные устройства. Это наиболее естественный сценарий развития в части оптимизации работы. Вполне возможно, наибольшее распространение эта

концепция получит в малом и среднем бизнесе, а также в малых инновационных предприятиях и инжиниринговых центрах вузов, т. к. среди этих компаний более высокая конкуренция и необходимость оптимизации расходов и издержек стоит более остро: при неоднородной степени реализации BYOD компании экономят деньги, а ее сотрудники работают более продуктивно [1].

В разных странах достигаемый компаниями экономический эффект различен. По результатам анализа компанией Cisco шести стран, сотрудник, использующий BYOD в общей структуре MDM, в среднем экономит 37 мин в неделю за счет использования личных устройств. В США экономия достигает 81 мин, а в Германии – лишь 4 мин [2]. Реализовав всестороннюю поддержку BYOD, компании смогут в полной мере использовать потенциал BYOD для повышения производительности труда (рис. 2).

В развитых странах (США, Великобритания и Германия) наибольший прирост производительности (21 %) при переходе от базовой к всесторонней реализации BYOD обусловлен новаторством сотрудников, рождающим принципиально новый формат работы. В развивающихся странах (Индия, Китай и Бразилия) наибольший эффект отмечается в тех областях, где базовая поддержка BYOD сказывается на производительности труда незначительно или даже отрицательно [1].

Речь идет о доступности (эффект не

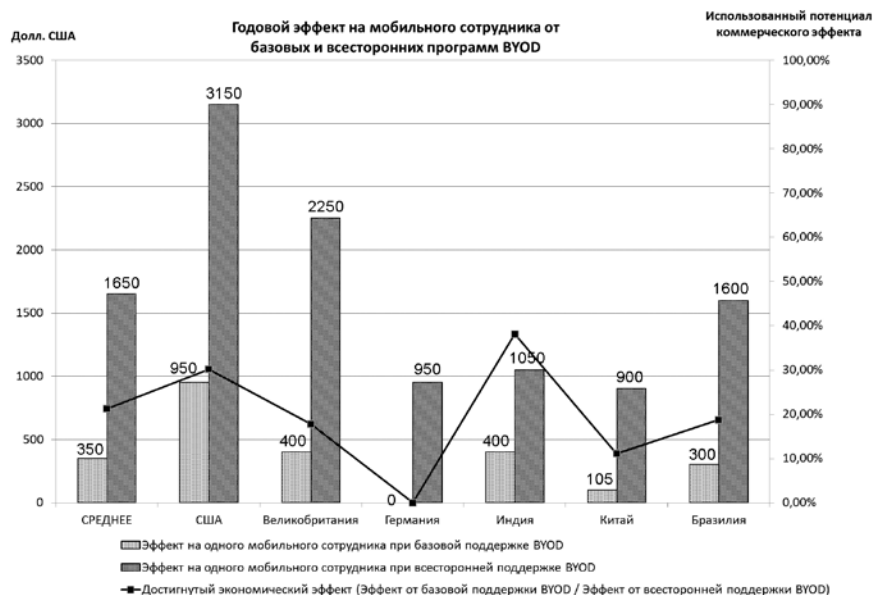


Рис. 2. Годовой эффект на мобильного сотрудника

ниже 20 % в каждой стране), вынужденных простоях и административных издержках (на них в совокупности приходится 28 % эффекта в Индии, 22 % в Китае и 38 % в Бразилии). Помимо прироста производительности, всесторонняя поддержка BYOD окупается за счет долгосрочного снижения издержек (рис. 3) [2].

Можно выделить три основных статьи экономии предприятий вузов [23]:

1. Расходы на оборудование. Устройства, которые раньше приходилось приоб-

ретать работодателю, теперь покупают сами сотрудники.

2. Расходы на поддержку. Компании при внедрении BYOD могут фактически сократить расходы на поддержку, используя ресурсы сообщества пользователей, wiki, форумы и другие варианты рационализации поддержки.

3. Расходы на связь. Перевод части мобильных пользователей с корпоративных тарифных планов на самостоятельно оплачиваемые тарифы позволяет сэкономить на

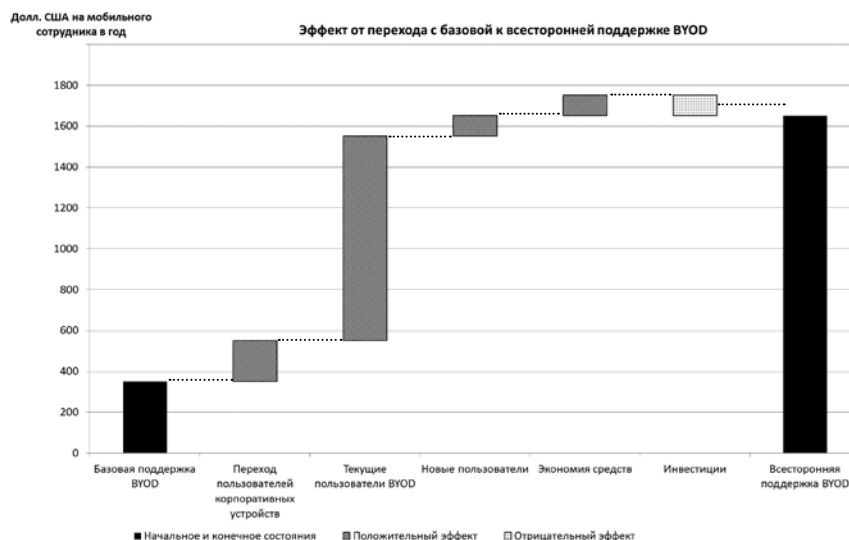


Рис. 3. Эффект от перехода к BYOD

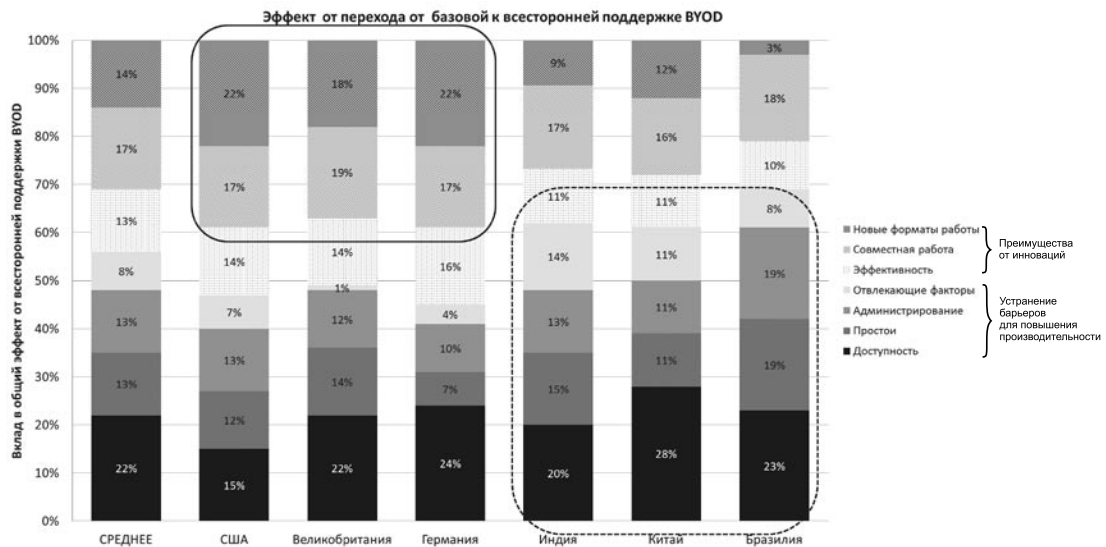


Рис. 4. Повышение производительности при переходе к BYOD

связи. По сообщениям некоторых компаний, таким путем удавалось перевести на самостоятельную оплату услуг до 20 % корпоративных пользователей.

Например, в части случаев, достаточным является использование VPN-шлюзов в связке с защитными агентами, которые дают возможность контроля подключаемых устройств (наличие антивируса, к примеру). В свою очередь развертывание полноценных виртуальных рабочих мест на базе VDI является более защищенным, но при этом более дорогим вариантом реализации BYOD. Помимо стоимости внедрения необходимо соотносить выгоду от использования собственных устройств с возможными рисками (рис. 4).

Для этого потребуются точно знать, как и во сколько оценивать возможные убытки. Это можно сделать на основе ответов на следующие вопросы [15, 16]:

Сколько стоит информация на мобильном устройстве?

Сколько стоит время простоя одного сотрудника?

Сколько теряет компания из-за невозможности сотрудника работать, находясь вне корпоративной сети?

Сколько стоит техническая поддержка мобильного сотрудника?

Сколько стоит программное обеспечение для мобильных устройств?

Для руководителей высшего звена эф-

фект от BYOD намного выше, чем для работников умственного труда. Исследования показывают, что руководители высшего звена помогли зарождению тенденции BYOD, когда начали приносить в офис свои собственные устройства и требовать от сотрудников ИТ-отдела обеспечить их поддержку [15].

В части BYOD компании не поддерживают своих специалистов на том же уровне, что и высшее руководство. Разрыв, составляющий почти час в неделю, говорит о неравном обеспечении ресурсами для BYOD. Только 41 % работников умственного труда имеют доступ к специальным корпоративным мобильным приложениям, в то время как среди руководителей высшего звена такой доступ имеют 61 % [17, 18].

В большинстве стран отмечается значительный разрыв между приростом производительности руководителей высшего звена и работников умственного труда. Эта тенденция особенно характерна для КНР и Германии (рис. 5).

В результате нашего исследования была сформирована предварительная версия системы индикаторов эффективности при использовании MDM и BYOD в процессах управления вузом (табл. 4).

Образовательным организациям необходимо пересмотреть внедрение информа-



Рис. 5. Приложения для руководителей и работников умственного труда

Таблица 4

Система индикаторов эффективности при использовании MDM и BYOD в вузе

	Наименование индикатора	Показатели для расчета	Расчет индикатора
1	Отношение между затратами на замену оборудования и обновления программного обеспечения (ПО) до и после внедрения MDM и BYOD	Затраты на замену оборудования и ПО при использовании MDM и BYOD и без использования MDM и BYOD	Разница между затратами на замену оборудования и ПО при использовании MDM и BYOD и до использования MDM и BYOD
2	Отношение затрат на покупку аппаратных средств до и после внедрения MDM и BYOD	Затраты на замену аппаратных средств при использовании MDM и BYOD и без использования MDM и BYOD	Разница между затратами на замену аппаратных средств при использовании MDM и BYOD и до использования MDM и BYOD
3	Отношение затрат на техническую поддержку до и после внедрения MDM и BYOD	Затраты на формирование технической поддержки при использовании MDM и BYOD и без использования MDM и BYOD	Разница между затратами на техническую поддержку при использовании MDM и BYOD и до использования MDM и BYOD
4	Повышение оперативности принятия управленческих решений	Значение среднего времени продолжительности бизнес-процессов и управленческих решений в вузе при использовании MDM и BYOD и без использования MDM и BYOD	Разница между средним временем продолжительности бизнес-процессов и управленческих решений в вузе при использовании MDM и BYOD и до использования MDM и BYOD

5	Положительная динамика уровня престижа вуза	Репутационное исследование по вопросам преподавания в рейтинге THE (Reputation survey teaching) при использовании MDM и BYOD; показатель социальной ответственности рейтинга GUR (Social Responsibility) при использовании MDM и BYOD и до использования MDM и BYOD	Разница в значениях показателей репутационного исследования по вопросам преподавания и показатель социальной ответственности в рейтингах THE и GUR до и после внедрения MDM и BYOD
6	Динамика улучшения условий обучения	Значение уровня обеспеченности ресурсами для обучения при использовании MDM и BYOD на одного обучающегося и до использования MDM и BYOD	Разница в значениях уровня обеспеченности ресурсами для обучения до и после внедрения MDM и BYOD

ционных технологий. Вместо принуждения пользователей к освоению новых технологий в рамках централизованных программ целесообразно позволить самим сотрудникам и студентам осваивать новшества, предоставив им социальные инструменты, которые позволили бы привлечь своим примером коллег. Как только отдел ИТ и руководители в вузе заметят стратегический эффект BYOD в части повышения производительности труда сотрудников, им будет необходимо перейти от восприятия BYOD как способа экономии к использованию потенциала этой концепции для перемены самого формата работы [20]. По этой причине BYOD представляет важность для вуза и заслуживает поддержки высшим руководством вне ИТ-подразделений. Действенная

политика BYOD должна путем виртуализации, облачных приложений и других технологий обеспечивать для компании постоянный контроль над местами и способами хранения корпоративных данных. Наконец, всесторонняя реализация BYOD в вузе успешно окупается за счет постоянного отказа от некоторых статей затрат и дает возможность для пересмотра принципов поддержки мобильных пользователей и предоставления корпоративных тарифных планов доступа в Интернет. С надлежащим вниманием к планированию и поддержке BYOD станет выигрышным решением как для вуза, так и для сотрудников.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, договор № 02.G25.31.0024 от 12.02.2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитический отчет Cisco. BYOD Smart Solution: Take a Comprehensive Approach to Secure Mobility, 2013 [электронный ресурс]/ URL: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-6500-series/switches/solution_overview_c22-702775.pdf (дата обращения: 10.10.2015).
2. Аналитический отчет Cisco. Schools Plug into BYOD: Mobile Devices Transform Learning at Katy ISD [электронный ресурс]/ URL: <http://www.slideshare.net/CiscoPublicSector/ciscoedukaty-sd-cs> (дата обращения: 10.10.2015).

3. Аналитический отчет Gardner. BYOD & Enterprise Mobility, 2015 [электронный ресурс]/ URL: <http://www.gartner.com/technology/topics/mobile.jsp> (дата обращения: 10.10.2015).
4. Аналитический отчет Gartner. Hype Cycle for Education, 2014 [электронный ресурс]/ URL: http://www85.homepage.villanova.edu/timothy.ay/TOP3090/hype_cycle_for_education.pdf (дата обращения: 21.09.2015).
5. Аналитический отчет Gartner. Gartner says worldwide smartphone sales soared in fourth quarter of 2011 with 47 percent growth, 2012 [электронный

ресурсы]/ URL: <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1924314> (дата обращения: 10.10.2015).

6. **Иванченко Д.А.** Управление мобильными технологиями в информационном пространстве современного вуза // Высшее образование в России. 2014. № 7. С. 93–100.

7. **Иванченко Д.А., Хмельков И.А., Райчук Д.Ю., Митрофанов А.М., Самочадин А.В., Рогов П.А.** Применение подходов BYOD для построения стратегии информатизации высшего учебного заведения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 3 (174). С. 85–92.

8. **Хмельков И.А., Попов С.О., Изосимов О.А.** Реализация модели и технологии распространения образовательного мультимедиа контента в российской системе образования // Открытое и дистанционное образование. 2012. Т. 3. № 47. С. 18–23

9. **Akour H.** Determinants of mobile learning acceptance: an empirical investigation in higher education. 2013 [электронный ресурс]/ URL: http://www.arubanetworks.com/pdf/technology/whitepapers/WP_MOVE.pdf (дата обращения: 10.10.2015).

10. **Alzaza N.S., Yaakub A.R.** Students' awareness and requirements of mobile learning services in the higher education environment // American Journal of Economics and Business Administration. 2011. No. 34. Pp. 95–100.

11. Best practices into leadership benefits of enabling personal handheld devices in the enterprise practices, 2011 [электронный ресурс]/ URL: <http://www.intel.com/content/dam/doc/best-practices/inte-itit-leadership-benefits-of-enabling-personal-handheld-devices-in-the-enterprisepactices.pdf> (дата обращения: 10.10.2015).

12. **Bestwick A., Campbell J.** Mobile Learning for All. The Exceptional Parent. 2010 [электронный ресурс]/ URL: http://ezpolson.nmu.edu:5749/ps/i.do?id=GALE%7CA242897857&v=2.1&u=1om_nmichu&it=r&p=AONE&sw=w (дата обращения: 10.10.2015).

13. **Busch C., De Maret P., Flynn T., Kellum R., Le S., Meyers B., Saunders M., White R.** Conceptual analysis. Colorado State University Writing Guide. 2008 [электронный ресурс]/ URL: <http://writing.colostate.edu/guides/research/content/com2b1.cfm> (дата обращения: 10.10.2015).

14. Electronic Document Management University of Cambridge. 2009 [электронный

ресурс]/ URL: <http://www.admin.cam.ac.uk/offices/misd/services/edms/> (дата обращения: 10.10.2015).

15. Financial System Centre University of Oxford. 2009 [электронный ресурс]/ URL: <http://www.admin.ox.ac.uk/finance/support/> (дата обращения: 10.10.2015).

16. **Medcalf R., Loucks J., Buckalew L., Faria F.** The Financial Impact of BYOD, A Model of BYOD's Benefits to Global Companies, 2013 [электронный ресурс]/ URL: http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/re/byod/BYODEconomics_Econ_Analysis.pdf (дата обращения: 10.10.2015).

17. **Miller M.** Where Is BYOD Heading? 2012 [электронный ресурс]/ URL: <http://fowardthinking.pcmag.com/none/304801-where-is-byod-heading> (дата обращения: 10.10.2015).

18. **Revenaugh D., Schweigert M.** BYOD: Moving toward a More Mobile and Productive Workforce // Montana Tech Library Digital Commons @ Montana Tech. 2014. No. 6. Pp. 35–41.

19. **Samochadin A., Raychuk D., Voinov N., Ivanchenko D., Khmelkov I.** MDM based Mobile Services in Universities // Internat. Journal of Information Technology & Computer Science. 2014. Vol. 13. No. 2. Pp. 35–41.

20. **Suki N.M., Suki N.M.** Using mobile device for learning: From students' perspective. US-China Education Review, 2011, Pp. 44–53 [электронный ресурс]/ URL: <http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/contentdelivery/servlet/ERICServlet?accno=ED522204> (дата обращения: 10.10.2015).

21. **Swan K. Hooft, M. Kratcoski, A., Unger D.** Uses and Effects of Mobile Computing Devices in K-8 Classrooms // Journal of Research on Technology Education. 2012. No. 38.1. Pp. 99–112.

22. **Valk J-H., Rashid A.T., Elder L.** Using Mobile Phones to Improve Educational Outcomes – An Analysis of Evidence from Asia. Pan Asia Networking, IDRC, Canada, 2010, P. 18 [электронный ресурс]/ URL: <http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/contentdelivery/servlet/ERICServlet?accno=ED522204> (дата обращения: 10.10.2015).

23. **Song I.** Driving Business Value with BYOD: A Research Manager with IDC's 2010 [электронный ресурс]/ URL: <http://h20195.www2.hp.com/V2/getpdf.aspx/4AA4-7040ENW.pdf> (дата обращения: 10.10.2015).

REFERENCES

1. *BYOD Smart Solution: Take a Comprehensive Approach to Secure Mobility*, 2013, 18 p. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-6500-series/switches/solution_overview_c22-702775.pdf (Accessed: 10.10.2015).

2. *Schools Plug into BYOD: Mobile Devices*

Transform Learning at Katy ISD. Available: <http://www.slideshare.net/CiscoPublicSector/ciscoedukaty-sd-cs> (Accessed: 10.10.2015).

3. *Gardner Report. BYOD & Enterprise Mobility*, 2015, 67 p. Available: <http://www.gartner.com/technology/topics/mobile.jsp> (Accessed: 10.10.2015).

4. *Gardner Report. Hype Cycle for Education*, 2014, 99 p. Available: http://www85.homepage.villanova.edu/timothy.ay/TOP3090/hype_cycle_for_education.pdf (Accessed: 21.09.2015).

5. Gartner says worldwide smartphone sales soared in fourth quarter of 2011 with 47 percent growth, 2012, 16 p. Available: <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1924314> (Accessed: 10.10.2015).

6. **Ivanchenko D.A.** Upravleniye mobilnymi tekhnologiyami v informatsionnom prostranstve sovremennogo vuza [Management of mobile technologies in the information space of the modern university] *Higher education in Russia Journal*, 2014, No. 7, Pp. 93–100. (rus)

7. **Ivanchenko D.A., Khmelkov I.A., Raychuk D.Yu., Mitrofanov A.M., Samochadin A.V., Rogov P.A.** Primeneniye podkhodov BYOD dlya postroyeniya strategii informatizatsii vysshego uchebnogo zavedeniya [Approaches BYOD strategy to build higher education informatization]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems], 2013, No. 3 (174), Pp. 85–92. (rus)

8. **Khmelkov I.A., Popov S.O., Izosimov O.A.** Realizatsiya modeli i tekhnologii rasprostraneniya obrazovatel'nogo multimedia kontenta v rossiyskoy sisteme obrazovaniya [The implementation of the model and technology dissemination of educational multimedia content in the Russian education system]. *Open and distance education Magazine*. Tomsk: Tomsk State University Publ., 2012, Vol. 3, No. 47, Pp.18–23. (rus)

9. **Akour H.** *Determinants of mobile learning acceptance: an empirical investigation in higher education*, 2013, 18 p. Available: http://www.arubanetworks.com/pdf/technology/whitepapers/WP_MOVE.pdf (Accessed: 10.10.2015).

10. **Alzaza N.S., Yaakub A.R.** Students' awareness and requirements of mobile learning services in the higher education environment. *American Journal of Economics and Business Administration*, 2011, No. 34, Pp. 95–100.

11. *Best practices into leadership benefits of enabling personal handheld devices in the enterprise practices*, 2011, 23 p. Available: [\[devices-in-the-enterprisepactices.Pdf\]\(#\) \(Accessed: 10.10.2015\).](http://www.intel.com/content/dam/doc/best-practices/inte-itit-leadership-benefits-of-enabling-personal-handheld-</p>
</div>
<div data-bbox=)

12. **Bestwick A., Campbell J.** *Mobile Learning for All. The Exceptional Parent*, 2010, 40 p. Available: http://ezpolson.nmu.edu:5749/ps/i.do?id=GALE%7CA242897857&v=2.1&u=lom_nmic_hu&it=r&p=AONE&sw=w (Accessed: 10.10.2015).

13. **Busch C., De Maret P., Flynn T., Kellum R., Le S., Meyers B., Saunders M., White R.** *Conceptual analysis. Colorado State University Writing Guide*, 2008, 38 p. Available: <http://writing.colostate.edu/guides/research/content/com2b1.cfm> (Accessed: 10.10.2015).

14. *Electronic Document Management University of Cambridge*, 2009, 28 p. Available: <http://www.admin.cam.ac.uk/offices/misd/services/edms/> (Accessed: 10.10.2015).

15. *Financial System Centre University of Oxford*, 2009, 29 p. Available: <http://www.admin.ox.ac.uk/finance/support/> (Accessed: 10.10.2015).

16. **Medcalf R., Loucks J., Buckalew L., Faria F.** *The Financial Impact of BYOD, A Model of BYOD's Benefits to Global Companies*, 2013, 14 p. Available: http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/re/byod/BYODEconomics_Econ_Analysis.pdf (Accessed: 10.10.2015).

17. **Miller M.** *Where is BYOD Heading?* 2012, 36 p. Available: <http://fowardthinking.pcmag.com/none/304801-where-is-byod-heading> (Accessed: 10.10.2015).

18. **Revenaugh D., Schweigert M.** BYOD: Moving toward a More Mobile and Productive Workforce. *Montana Tech Library Digital Commons @ Montana Tech*, 2014, No. 6, Pp. 35–41.

19. **Samochadin A., Raychuk D., Voinov N., Ivanchenko D., Khmelkov I.** MDM based Mobile Services in Universities. *International Journal of Information Technology & Computer Science (IJITCS)*, 2014, Vol. 13, No. 2, Pp. 35–41.

20. **Suki N.M., Suki N.M.** *Using mobile device for learning: From students' perspective. US-China Education Review*, 2011, Pp. 44–53. Available: <http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/contentdelivery/servlet/ERICServlet?accno=ED522204> (Accessed: 10.10.2015).

21. **Swan, K. Hoof, M. Kratoski, A., Unger, D.** Uses and Effects of Mobile Computing Devices in K-8 Classrooms. *Journal of Research on Technology Education*, 2012, No. 38.1, Pp. 99–112.

22. **Valk J-H., Rashid A.T., Elder L.** *Using Mobile Phones to Improve Educational Outcomes – An Analysis of Evidence from Asia. Pan Asia Networking, IDRC, Canada*, 2010, P. 18. Available: <http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/contentdelivery/servlet/ERICServlet?accno=ED522204> (Accessed: 10.10.2015).

23. Song I. *Driving Business Value with BYOD: A Research Manager with IDC's*, 2010, 18 p. Available: <http://h20195.www2.hp.com/V2/getpdf.aspx/4AA4-7040ENW.pdf> (Accessed: 10.10.2015).
-

КОЛОСКОВ Сергей Сергеевич — младший консультант, Информационные бизнес-системы (IBS).
127434, Россия, Москва, Дмитровское ш., д. 9Б.
E-mail: SKoloskov@IBS.ru

KOLOSOKV Sergey S. *Information Business Systems (IBS)*.
127434, Dmitrovskoye shosse, 9B, Moscow, Russia.
E-mail: SKoloskov@IBS.ru

БАБЕШКО Владимир Николаевич — доцент Национального исследовательского технологического университета МИСиС, кандидат технических наук.
119049, Россия, Москва, Ленинский пр., д. 4.
E-mail: vbabeshko@mail.ru

BABESHKO Vladimir N. *The National University of Science and Technology MISiS*.
119049, Leninskiy Ave. 4, Moscow, Russia.
E-mail: vbabeshko@mail.ru

САМОЧАДИН Александр Викторович — профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: samochadin@gmail.com

SAMOCHADIN Alexander V. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: samochadin@gmail.com



DOI: 10.5862/JCSTCS.234.9

УДК 004

*Д.А. Тимофеев, А.В. Самочадин***СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ
НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ***D.A. Timofeev, A.V. Samochadin***A MOBILE SERVICE FOR ASSESSMENT BASED ON A MOBILE DEVICE
MANAGEMENT SYSTEM**

Систематический контроль знаний студентов, обычно реализуемый в форме тестов, играет важную роль в процессе обучения. Тестирование в письменной форме связано со значительными затратами времени на обработку результатов, а применение технологий компьютерного тестирования предъявляет требования к техническому оснащению аудитории. Снизить эти требования можно путем использования мобильных устройств студентов. В статье рассмотрена архитектура и порядок использования мобильного сервиса текущего контроля успеваемости, а также приведены результаты апробации сервиса, проведенной в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.

КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ; КОМПЬЮТЕРНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ; МОБИЛЬНЫЙ СЕРВИС; СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ.

Testing is an important method for assessing the academic performance of students, providing the necessary feedback to students and instructors. Traditional written tests are common but require much time to process the results. Computer-based testing allows for automatic checking of submitted answers but requires computers and network equipment that make it inappropriate for many classrooms or for classes with multiple participants. This problem may be solved using students' mobile devices. This paper describes the architecture of a mobile service for testing based on an enterprise mobile management platform and the results of evaluation of the service in Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

ASSESSMENT; COMPUTER TESTING; MOBILE SERVICE; MOBILE DEVICE MANAGEMENT SYSTEM.

Цель текущего контроля успеваемости — оценка качества освоения обучающимися учебных дисциплин основных образовательных программ в течение всего периода обучения, приобретения и развития ими навыков самостоятельной работы и повышения академической активности. Текущий контроль не только дает преподавателям и руководителям учебных подразделений возможность оценивать ход выполнения студентами учебного плана, но и является важным механизмом обратной связи при обучении [1]. Наибольшая эффективность текущего контроля успеваемости обеспечивается, если он проводится регулярно [2].

Одним из наиболее популярных инстру-

ментов текущего контроля знаний является тестирование. Организация тестирования включает три этапа: подготовка вариантов теста, проведение теста и обработка результатов. Чтобы тестирование можно было проводить достаточно часто, обеспечивая регулярность текущего контроля, необходимо минимизировать затраты времени на каждом этапе.

Тестирование может проводиться как в традиционной письменной форме, так и с помощью персонального компьютера или мобильных устройств. Выбор каждого из этих способов накладывает определенные ограничения на оснащение аудитории, вид тестовых заданий, возможности автомати-

зированной оценки результатов, соотношение между временем тестирования и временем, необходимым на подготовительные операции.

Основная задача, которой посвящена данная статья, состоит в разработке подхода к автоматизации тестирования, который обеспечил бы выполнение трех основных условий:

- минимизация времени, необходимого для проведения текущего контроля во время занятия;
- автоматизация проверки тестов и сокращение затрат времени на обработку результатов теста;
- отсутствие специальных требований к техническому обеспечению аудитории, в которой проводится тестирование.

Предлагаемое нами решение состоит в организации тестирования с помощью принадлежащих студентам мобильных устройств (смартфонов, планшетов), подключаемых к системе управления мобильными устройствами образовательного учреждения. Этот подход реализован в мобильном сервисе текущего контроля, созданном на базе разработанной Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого и компанией IBS платформы «СмартГейт». Сокращение временных затрат на проведение тестирования с помощью мобильных устройств было подтверждено в ходе апробации этого сервиса в Институте компьютерных наук и технологий СПбПУ Петра Великого.

Подходы к организации тестирования

Выбор способа проведения тестов зависит от ряда факторов, в первую очередь от формы, в которой реализуется образовательная программа. В данной статье речь идет о контроле успеваемости, осуществляемом во время занятий, проводимых в аудиториях образовательного учреждения.

В настоящее время используются три основных способа проведения теста:

в письменном виде, обычно с использованием печатных бланков, в которых необходимо отметить или вписать правильные варианты ответов;

в электронной форме с помощью пер-

сонального компьютера, выполняющего специализированное приложение или обеспечивающего доступ к тесту с помощью web-интерфейса;

в электронной форме с помощью мобильных устройств (смартфонов, планшетов).

Достоинством письменной формы проведения теста является отсутствие требований к техническому оснащению аудитории, в которой проводится тестирование. При использовании персональных компьютеров, включая ноутбуки, аудитория должна быть ими оборудована. В некоторых случаях можно использовать компьютеры, принадлежащие студентам, но в обычной практике такая возможность ограничена. Используемые для тестирования компьютеры обычно должны быть подключены к локальной сети образовательного учреждения или сети Интернет.

Основными ограничениями письменного тестирования являются существенные затраты времени на проведение теста (включая раздачу и сбор бланков) и обработку результатов. Тем не менее благодаря отсутствию требований к техническому обеспечению процесса тестирования (за исключением наличия необходимого количества бланков заданий), проведение тестов в письменной форме широко распространено, особенно в случае массового тестирования (например, при проведении ЕГЭ).

Компьютерное тестирование позволяет существенно сократить затраты времени на проведение и, что более важно, на обработку результатов теста. Для вопросов закрытого типа, чаще всего используемых в тестировании [1], проверка правильности ответа выполняется автоматически путем сравнения ответа с эталонным ответом, заданным автором теста. Таким образом, результаты становятся доступны преподавателю непосредственно по окончании тестирования.

Подготовка вариантов теста в случае компьютерного тестирования автоматизируется: обычно задания выбираются случайным образом из сформированной преподавателем базы тестовых заданий. Такой метод можно использовать и для письменного тестирования, распечатывая необхо-



димое количество автоматически сформированных вариантов теста. Тем не менее компьютерное тестирование позволяет реализовать такие разновидности тестирования, которые невозможны при использовании традиционной письменной формы: например, адаптивное тестирование, при котором выбор очередного задания зависит от результата выполнения предыдущих заданий. Примером адаптивного тестирования является, в частности, работа [3]; в проведенном ее авторами эксперименте использование адаптивных тестов привело к сокращению времени тестирования и увеличило точность оценки знаний студентов.

Сегодня большинство студентов имеют одно или несколько мобильных устройств и в значительной степени заинтересованы в использовании своих устройств для обучения [4, 5]. В этих условиях большой интерес вызывает внедрение мобильных технологий в учебный процесс — в том числе для тестирования знаний студентов [6–8].

Проведение тестов с помощью мобильных устройств является частным случаем компьютерного тестирования и имеет все его сильные стороны. При этом, по сравнению с традиционным компьютерным тестированием, использование мобильных устройств в значительной степени снижает требования к техническому оснащению аудиторий, т. к. студенты могут использовать собственные устройства. Хотя предоставление студентам доступа к локальной сети (в данном случае беспроводного) может быть по-прежнему необходимым, постоянное повышение доступности технологий мобильного доступа в Интернет, в том числе возможность использования мобильного устройства в качестве точки доступа, во многих случаях позволяет снять и это ограничение. Таким образом, с точки зрения преследуемой нами цели организация тестирования с помощью собственных мобильных устройств студентов наиболее эффективна.

Одним из распространенных подходов к организации тестирования с помощью мобильных устройств является их использование в качестве средства доступа к системам поддержки образовательного процесса [9–12]. Такой подход позволяет использо-

вать все развитые возможности тестирования, которые предоставляют эти системы, а также обеспечивает возможность использования персональных компьютеров и ноутбуков, при их наличии, наравне с мобильными устройствами. В целом этот подход оказывается эффективным и положительно воспринимается студентами [10–12], хотя использование мобильных устройств может затруднять выполнение некоторых более сложных операций, недостаточно поддерживаемых существующими мобильными приложениями [12].

Второй подход к внедрению мобильных средств тестирования состоит в разработке специализированных сервисов, реализующих собственные алгоритмы формирования и проведения тестов. Такие системы могут разрабатываться в экспериментальных целях для исследования конкретной методики тестирования [8], но чаще тогда, когда необходимая функциональность не поддерживается существующими системами (например, учет эффекта спонтанного переключения с языка на язык при обучении на неродном языке студента [13]). Распространенным случаем является реализация сервиса тестирования как компонента более общей системы мобильного обучения [13–15]. При этом специализированные сервисы могут использовать дополнительные возможности мобильных устройств, включая оборудование (камеры, датчики NFC, интерфейсы передачи данных), и саму возможность перемещения устройства в пространстве. Так, в работе [14] рассматривается подход к тестированию, при котором вместо выбора варианта ответа в списке студент должен найти среди предлагаемого ему набора реальный предмет, обладающий необходимыми свойствами. В статье [15] описан подход к обучению медицинских сестер, использующий мобильные устройства для получения информации о показателях состояния пациентов, которые моделируются с помощью оснащенных датчиками манекенов.

Таким образом, целью представляемой работы является создание архитектуры системы тестирования знаний, позволяющей использовать принадлежащие студентам

мобильные устройства. Внедрение такой системы должно сократить время, затрачиваемое на проведение текущего контроля успеваемости, и снизить требования к техническому оснащению аудиторий. С учетом мирового опыта использования мобильных устройств для тестирования знаний студентов можно сформулировать дополнительные требования к системе:

система тестирования должна предоставлять возможность интеграции с другими образовательными сервисами для создания единой платформы мобильного обучения;

должна обеспечивать проведение текущего контроля без необходимости развертывания полнофункциональных систем поддержки учебного процесса, но допускать интеграцию с такими системами;

система должна иметь модульную архитектуру, позволяя добавлять новые методы тестирования.

Предлагаемое решение состоит в реализации системы тестирования в виде сервиса, интегрированного в систему управления мобильностью организации.

Сервис текущего контроля успеваемости

Организация тестирования с помощью мобильных устройств студентов требует решения ряда стандартных задач, таких как аутентификация, авторизация, а при ис-

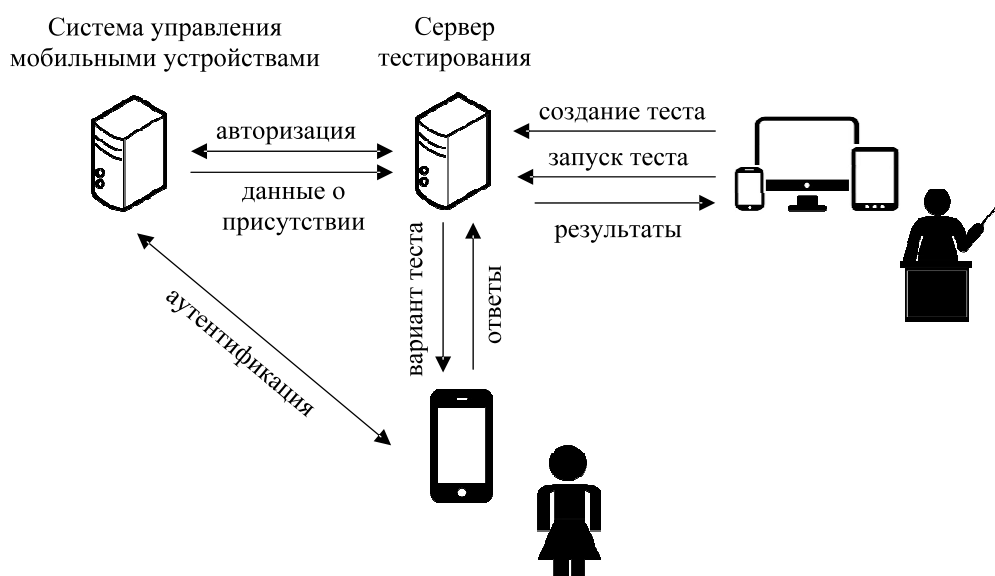
пользовании родных для мобильной платформы приложений — установка приложения на устройство пользователя. В связи с этим целесообразно разрабатывать сервис текущего контроля успеваемости на основе платформы, включающей систему управления мобильными устройствами и реализующей типовые функции мобильных сервисов. В данной работе за основу взята платформа «СмартГейт», разработанная Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого совместно с компанией IBS.

Архитектура сервиса представлена на рисунке. Она включает в себя сервер тестирования, входящую в состав платформы систему управления мобильными устройствами, а также устройства студентов и преподавателей.

Система управления мобильными устройствами обеспечивает регистрацию мобильных устройств студентов и преподавателей, предоставляет общий интерфейс для взаимодействия с сервисами и ряд стандартных функций, в том числе аутентификацию и авторизацию зарегистрированных устройств.

Сервер тестирования выполняет следующие функции:

управление базой данных заданий и тестов;



Архитектура сервиса текущего контроля



формирование вариантов теста;
проверка правильности ответов;
формирование отчетов о результатах тестирования.

Благодаря взаимодействию с системой управления мобильными устройствами, сервис тестирования может обращаться к данным других сервисов. В частности, в ходе текущего контроля используются данные о присутствии студентов в аудитории, предоставляемые сервисом учета посещаемости [16]. Программный интерфейс системы управления мобильными устройствами, входящей в платформу «СмартГейт» [17], предоставляет унифицированный способ идентификации сервисов, что позволяет вместо использования встроенных функций тестирования организовать взаимодействие с другими системами тестирования, включая популярные системы поддержки образовательного процесса. В этом случае для каждой такой системы должен быть реализован сервис-адаптер, обеспечивающий ее взаимодействие с системой управления мобильными устройствами.

Для проведения тестирования преподаватель должен подготовить набор вопросов с вариантами ответов и определить правила формирования вариантов теста. В настоящее время поддерживаются два способа формирования вариантов: один вариант для всех студентов или фиксированная последовательность блоков со случайным выбором вопросов внутри блока. Архитектура сервиса позволяет добавить и другие методы формирования вариантов, включая адаптивные тесты. Во время занятия преподаватель запускает процесс тестирования. При этом всем зарегистрированным на занятии студентам отправляется ссылка, дающая доступ к мобильному интерфейсу теста. В ходе работы студент выбирает варианты ответов на вопросы теста и отправляет результаты на сервер. Проверка правильности ответов выполняется автоматически. После завершения теста преподаватель получает сводную таблицу результатов тестирования, а также может инициировать отправку личных результатов каждого студента на его мобильное устройство. Результаты тестирования могут быть переданы сервису

аттестации [18], взаимодействие с которым также обеспечивается через реализуемый системой управления мобильными устройствами интерфейс.

Результаты апробации

В октябре и ноябре 2015 г. в СПбПУ Петра Великого была проведена апробация платформы мобильных сервисов «СмартГейт», в ходе которой сервис текущего контроля успеваемости использовался для организации тестирования студентов Института компьютерных наук и технологий СПбПУ. В апробации приняли участие шесть преподавателей и 128 студентов.

Ранее в СПбПУ проводился опрос, в котором преподавателей просили оценить свои временные затраты на организацию проведения теста и обработку результатов теста при используемой ими технологии. В соответствии с данными ответами, 17 % опрошенных преподавателей затрачивали на вспомогательные операции при проведении текущего контроля менее 5 мин, 50 % — от 5 до 10 мин, 33 % — более 10 мин. Обработка результатов теста у 44 % опрошенных преподавателей требовала от 5 мин до 1 ч, у 50 % — от 1 до 3 ч, у 6 % — более 3 ч.

Свои оценки соответствующих показателей для мобильного сервиса текущего контроля успеваемости дали пять из шести преподавателей, участвовавших в апробации. Время, затраченное на вспомогательные операции при проведении теста, составило менее 3 мин (два участника) или от 3 до 5 мин (три участника). Время, затраченное на обработку результатов, трое участников оценили как не превышающее 5 мин, один — от 5 до 10 мин, один — более 10 мин (в этом случае время обработки результатов, с точки зрения преподавателя, включало их анализ). При этом все ответившие на вопросы преподаватели оценили процедуру обработки результатов тестирования, которое выполнялось с помощью мобильного сервиса, как более удобную, чем при использовании ранее применявшихся технологий.

В целом с точки зрения преподавателей удобство проведения текущего контроля с

помощью мобильных устройств увеличилось (четыре человека), один преподаватель счел новую технологию в той же степени удобной, что и ранее использовавшуюся. Среди опрошенных студентов 48 % сочли удобство процедуры тестирования с помощью мобильных устройств сравнимым с ранее использовавшимися технологиями, 52 % сочли апробируемую технологию более удобной.

Исследование педагогической эффективности процедуры тестирования с помощью мобильных устройств по сравнению с традиционной письменной формой и другими технологиями компьютерного тестирования не было целью апробации. Тем не менее апробация подтвердила возможность применения мобильных устройств студентов для текущего контроля успеваемости, в том числе в необорудованных аудиториях. При этом как преподаватели, так и студенты оценили опыт использования мобильного сервиса как положительный.

В статье описана архитектура мобильного сервиса текущего контроля успеваемости, основанного на системе централизованного управления мобильными устройствами. Предложенная архитектура

позволяет использовать собственные мобильные устройства обучающихся и не требует дополнительного оборудования в аудитории. Благодаря этому тестирование может проводиться как во время практических занятий, так и во время лекций для потока из нескольких групп. Использование предложенной архитектуры позволяет существенно сократить время, необходимое для подготовки к проведению тестирования, и время обработки результатов. Эти преимущества дают возможность осуществлять постоянный контроль уровня усвоения знаний, что способствует совершенствованию учебного процесса.

Предложенная архитектура была реализована в виде сервиса текущего контроля успеваемости на базе разработанной Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого и компанией IBS платформы мобильных сервисов «Смарт-Гейт». Апробация сервиса подтвердила эффективность использования мобильных устройств студентов для организации компьютерного тестирования, в том числе в аудиториях без специального оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, договор № 02.G25.31.0024 от 12.02.2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ким В.С.** Тестирование учебных достижений. Усурийск: Изд-во УГПИ, 2007. 214 с.
2. **Миняева О.А., Ушакова В.А., Зайцева Е.В., Чудинова Ю.С., Зайцева Э.Ю.** Место тестовых заданий в современной системе подготовки специалистов высшего профессионального образования // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 12-2. С. 259–263.
3. **Triantafillou E., Georgiadou E., Economides A.A.** The design and evaluation of a computerized adaptive test on mobile devices // Computers & Education. 2008. Vol. 50. No. 4. Pp. 1319–1330.
4. **Тимофеев Д.А., Самочадин А.В.** Анализ востребованности мобильных сервисов для образовательных учреждений // Компьютерные инструменты в образовании. 2015. № 5. С. 24–32.
5. **Карпенко О.М., Фокина В.Н., Абрамова А.В., Широкова М.Е.** Мобильное обучение в структуре образования. // Социология образования. 2015. № 5. С. 31–45.
6. **Титова С.В.** Мобильное обучение сегодня: стратегии и перспективы // Вестник Московского университета. 2012. Т. 19. С. 9–23.
7. **Кудрявцев А.В.** Новые возможности использования мобильных устройств в учебном процессе вуза // Педагогическое образование в России. 2015. № 7. С. 71–76.
8. **Nikou S., Economides A.A.** Student achievement in paper, computer/web and mobile based assessment // BCI. 2013. Pp. 107–114.
9. Moodle Mobile [электронный ресурс] / URL: https://docs.moodle.org/dev/Moodle_Mobile (дата обращения: 31.12.2015).
10. **Schön D., Klinger M., Korf S., Effelsberg W.** MobileQuiz – a lecture survey tool using smartphones and QR tags // Internat. Journal of Digital Information and Wireless Communication. 2012. No. 2(3). Pp. 231–244.
11. **Bogdanović Z., Barać D., Jovanić B., Popović S., Radenković B.** Evaluation of mobile assessment in a learning management system // British Journal of Education Technology. 2014. No. 45(2). Pp. 231–244.

12. Hu X., Lei L.C.U., Li J., Iseli-Chan N., Siu F.L.C., Chu S.K.W. Access Moodle using mobile phones: student usage and perceptions // *Mobile Learning Design*. Springer, 2015. Pp. 155–171.

13. Jantjies M., Joy M. Mobile Enhanced Learning in a South African Context // *Educational Technology & Society*. No. 18(1). Pp. 308–320.

14. Cheng T.-S., Lu Y.-C., Chang C.-C., Yang C.-S. Combining mobile devices with NFC technology in a test assessment system // *IEEE 15th Internat. Conf. on Advanced Learning Technologies*. 2015. Pp. 241–243.

15. Wu P.-H., Hwang G.-J., Su L.-H., Huang Y.-M. A context-aware mobile learning system for supporting cognitive apprenticeships in nursing skills training // *Educational Technology & Society*. 2012. No. 15(1). Pp. 223–236.

16. Райчук Д.Ю., Самочадин А.В., Тимофеев

Д.А., Лукин А.А., Хмельков И.А. Средства автоматизированной регистрации участников мероприятий // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2014. № 6 (210). С. 24–32.

17. Маслов М.Ю., Носницын С.М., Самочадин А.В., Логинов К.Е. Архитектура средств управления мобильными устройствами для образовательных учреждений // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2015. № 5 (229). С. 97–107.

18. Райчук Д.Ю., Самочадин А.В., Носницын С.М., Хмельков И.А. Комплекс мобильных средств поддержки учебного процесса // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2014. № 6 (210). С. 7–15.

REFERENCES

1. Kim V.S. *Testirovaniye uchebnykh dostizheniy* [Assessment of students performance]. Ussuriysk: UGPI Publ., 2007, 214 p. (rus)

2. Minyayeva O.A., Ushakova V.A., Zaytseva Ye.V., Chudinova Yu.S., Zaytseva E.Yu. Mesto testovykh zadaniy v sovremennoy sisteme podgotovki spetsialistov vysshego professionalnogo obrazovaniya [The place of test problems in modern system of higher education professionals preparation]. *Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk*, 2013, No. 12-2, Pp. 259–263. (rus)

3. Triantafillou E., Georgiadou E., Economides A.A. The design and evaluation of a computerized adaptive test on mobile devices. *Computers & Education*, 2008, Vol. 50, No. 4, Pp. 1319–1330.

4. Timofeev D.A., Samochadin A.V. Analiz vostrebovannosti mobilnykh servisov dlya obrazovatelnykh uchrezhdeniy [Analysis of user expectation of mobile services in education]. *Kompyuternyye instrumenty v obrazovanii*, 2015, No. 5, Pp. 24–32. (rus)

5. Karpenko O.M., Fokina V.N., Abramova A.V., Shirokova M.Ye. Mobilnoye obucheniye v strukture obrazovaniya [Mobile education in the structure of higher education]. *Sotsiologiya obrazovaniya*, 2015, No. 5, Pp. 31–45. (rus)

6. Titova S.V. Mobilnoye obucheniye segodnya: strategii i perspektivy [Mobile education today: strategies and perspectives]. *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 2012, No. 19, Pp. 9–23. (rus)

7. Kudryavtsev A.V. Novyye vozmozhnosti ispolzovaniya mobilnykh ustroystv v uchebnom protsesse vuza [New possibilities of mobile device usage in the university educational process]. *Pedagogicheskoye obrazovaniye v Rossii*, 2015, No. 7, Pp. 71–76. (rus)

8. Nikou S., Economides A.A. Student achievement in paper, computer/web and mobile based assessment. *BCI*, 2013, Pp. 107–114.

9. Moodle Mobile. Available: https://docs.moodle.org/dev/Moodle_Mobile (Accessed: 31.12.2015).

10. Schön D., Klinger M., Korf S., Effelsberg W. MobileQuiz – a lecture survey tool using smartphones and QR tags. *International Journal of Digital Information and Wireless Communication*, 2012, No. 2 (3), Pp. 231–244.

11. Bogdanović Z., Barać D., Jovanić B., Popović S., Radenković B. Evaluation of mobile assessment in a learning management system. *British Journal of Education Technology*, 2014, No. 45 (2), Pp. 231–244.

12. Hu X., Lei L.C.U., Li J., Iseli-Chan N., Siu F.L.C., Chu S.K.W. Access Moodle using mobile phones: student usage and perceptions. *Mobile Learning Design*, Springer, 2015, Pp. 155–171.

13. Jantjies M., Joy M. Mobile Enhanced Learning in a South African Context. *Educational Technology & Society*, No. 18 (1), Pp. 308–320.

14. Cheng T.-S., Lu Y.-C., Chang C.-C., Yang C.-S. Combining mobile devices with NFC technology in a test assessment system. *IEEE 15th International Conference on Advanced Learning Technologies*, 2015, Pp. 241–243.

15. Wu P.-H., Hwang G.-J., Su L.-H., Huang Y.-M. A context-aware mobile learning system for supporting cognitive apprenticeships in nursing skills training. *Educational Technology & Society*, 2012, No. 15 (1), Pp. 223–236.

16. Raychuk D.Yu., Samochadin A.V., Timofeev D.A., Lukin A.A., Khmelkov I.A. Sredstva avtomatizirovannoy registratsii uchastnikov meropriyatiy [An approach to automated attendance checking of events participants]. *Nauchno-*

tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems], 2014, No. 6 (210), Pp. 24–32. (rus)

17. **Maslov M.Yu., Nosnitsyn S.M., Samochadin A.V., Loginov K.Ye.** Arkhitektura sredstv upravleniya mobilnymi ustroystvami dlya obrazovatelnykh uchrezhdeniy [An architecture of an enterprise mobility management suite for education establishments]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*

[St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems], 2015, No. 5 (229), Pp. 97–107. (rus)

18. **Raychuk D.Yu., Samochadin A.V., Nosnitsyn S.M., Khmelkov I.A.** Kompleks mobilnykh sredstv podderzhki uchebnogo protsessa [A set of mobile applications to support the education process]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems], 2014, No. 6 (210), Pp. 7–15. (rus)

ТИМОФЕЕВ Дмитрий Андреевич — старший преподаватель кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: dtim@dcn.icc.spbstu.ru

TI MOFEEV Dmitri A. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: dtim@dcn.icc.spbstu.ru

САМОЧАДИН Александр Викторович — профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: samochadin@gmail.com

SAMOCHADIN Alexander V. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: samochadin@gmail.com

The Ninth IEEE International Conference on Ubi-media Computing (U-Media 2016)

<http://2016.umediaconf.com>

Moscow, Russia, August 15-17, 2016



General Co-Chairs

Stanislav V. Klimenko, Institute of Computing for Physics and Technology,
Moscow Institute of Physics and Technology, Russia
Nam Ling, Santa Clara University, USA
Alexander Vazhenin, University of Aizu, Japan
Xinwei Wang, Northeastern University, China

Conference Co-Chairs

K. P. Hewagamage, University of Colombo School of Computing, Sri Lanka
Amartuvshin Amarzaya, National University of Mongolia, Mongolia
Robert Hsu, Chung Hua University, Taiwan
Chih-Lin Hu, National Central University, Taiwan

Program Co-Chair

Dmitry Novikov, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy
of Sciences, Russia
Alexander Raikov, Analytical Agency "New Strategies", Russia
Neil Yen, University of Aizu, Japan
Kanoksak Wattanachote, National Central University, Taiwan

Workshop Co-Chairs

Kanokvate Tungpimolrut, National Electronic and Computer Technology
Center, Thailand
Daqiang Zhang, Tongji University, China

Publicity Co-Chairs

Zhiwen Yu, Northwestern Polytechnical University, China
Somchoke Ruengittinun, Kasetsart University, Thailand
Chiou-Yng Lee, LungHwa University of Sci. and Tech., Taiwan

Local Arrangement Co-Chairs

Maria Berberova, Institute of Computing for Physics and Technology,
Moscow Institute of Physics and Technology, Russia
Alexei Mashkanov, Institute of Computing for Physics and Technology,
Russia
Te-Hua Wang, Chihlee University of Technology, Taiwan

Publication Co-Chairs

Yung-Hui Chen, LungHwa University of Sci. and Tech., Taiwan
Kirill Chuvilin, Institute of Computing for Physics and Technology,
Moscow Institute of Physics and Technology, Russia

Financial Chair

Vladimir Zaldharushkin, Institute of Computing for Physics and
Technology, Moscow Institute of Physics and Technology (State
University), Russia

Web Chair

Ravshan Burhonov, Moscow Institute of Physics and Technology, Russia
Chalothon Chootong, Kasetsart University Sriracha Campus, Thailand

Events in the cyberspace can be modeled as a spatiotemporal continuity populated by computing devices, communication channels, and multimodal interactions. Contemporary ubiquitous devices unleash the boundary of one-to-one human-computer interaction. E.g., it has become a de facto style of facilitating social events that participants use several distributed devices through multimodal interaction. How people access multimodal media in different context is an interesting yet challenging problem. Ubi-media Computing, as it is bravely defined, brings together technologies for location/context adaptation, inter-device interaction/reaction, and media/data communication.

In line with the blooming technologies realizing the above concepts, this international conference looks at the state-of-the-art and original research issues to be published in the proceedings. New contributions include three perspectives: devices that realize ubiquitous computing, multimodal interactions between human and these ubiquitous devices, and the need of adaptive multimedia.

The conference proceedings will be published by IEEE, with best papers recommended for publication in special issues of international journals. Topics of interests include but not limit to the following:

- Ubi-Media Infrastructure/Systems
Wireless and mobile networking for ubiquitous multimedia
Mobility computing systems, Peer-to-peer networking
Network architectures, protocols, and algorithms
Ad hoc and sensor network, Cross-layer design
Advanced communication techniques, Smart objects
Cognitive computing in Ubi-Media Systems
- Ubi-Media Middleware & Tools
Adaptive, autonomic and context-aware computing
Cross-network media server, Computational intelligences
Semantic web and knowledge grid, Content protection
Privacy & security in ubiquitous environments
Agent technologies, Human-computer interaction
Programming models for Ubi-Media, Knowledge representation and ontology
- Ubi-Media Services and Managements
Service provisioning for ubiquitous multimedia
Quality of service, Resource sharing and service discovery
Location-based services, Context-aware services
Tracking in ubiquitous environments, Operating system support
Data replication, migration and dissemination for ubiquitous multimedia
- Ubi-Media Applications
Ubi-media for education / commerce, Ubi-media for entertainment / games
Ubi-media for medical / health care, Ubi-media for smart home / smart city
Ubi-media for citizens and E-government, Ubi-media for intelligent mobility
Ubi-media for environmental protection, Ubi-media for public safety and security
Innovative Ubi-Media applications

IMPORTANT DATES

Paper Submission: March 1st, 2016

Author Notification: April 15th, 2016

Final Manuscript Due: May 15th, 2016

Early Registration Due: June 1st, 2016

MANUSCRIPT FORMAT

Do not exceed 6 single-space double column, 8.5 x 11-inch pages (including figures, tables and references) in 11 point Times Roman or similar font. Number each page. Include an abstract, five to ten keywords, the technical area(s) most relevant to your paper, and the corresponding author's e-mail address. Submissions should represent original, substantive research results. We will not accept any paper which, at the time of submission, is under review for or has already been published (or accepted) for publication in another conference or journal.

SUBMISSION DETAILS

Submitted papers will be carefully evaluated based on originality, significance, technical soundness, and clarity of exposition. All papers will be refereed by at least two members of the program committee. All submitted papers MUST be formatted according to the author guidelines provided by IEEE Computer Society Press (two-column format) and MUST NOT be longer than SIX pages.



«СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И ФИЗИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА»

Международная конференция и выставка COMSEC проводится с 9 по 12 февраля 2016 года в Санкт-Петербурге и Москве. Организаторы мероприятия – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, Военная академия связи имени С.М. Буденного и компания «Эдвиста».

В работе конференции и выставки примут участие более трехсот представителей организаций, предприятий и компаний из четырнадцати стран мира.

COMSEC-2016 предоставляет участникам уникальную возможность установить прямые контакты с руководителями крупнейших предприятий атомной, оборонной, телекоммуникационной и других отраслей промышленности России, СНГ и других стран, познакомиться с разработками и научными достижениями ведущих ученых и специалистов.

Подробная информация о секциях конференции и разделах выставки COMSEC-2016 на сайте www.comsec2016.ru

На COMSEC-2016 планируются посещения предприятий и организаций производителей и разработчиков технических и инженерных систем и средств безопасности, телекоммуникационного оборудования и физической защиты, а также выступления участников с докладами на пленарных и секционных заседаниях.

Возможны очное и заочное участие в мероприятии, участие в работе конференции в качестве слушателей докладов и посещение выставки по пригласительным билетам Организационного комитета.

Председатель Программного комитета С.В. Кириенко, генеральный директор ГК «Росатом».
Председатель Организационного комитета Р.Ш. Тухватулин, генеральный директор МСУИТ.

Для участия в работе COMSEC-2016 необходимо заполнить регистрационную форму на сайте www.comsec2016.ru, сообщить о регистрации в Организационный комитет по тел. +7 (981) 156 22 46, +7 (931) 594 43 86 и на e-mail: edvista2012@yandex.ru, rashid.tukhvatulin@gmail.com



CSTA2016
International Conference on
Computer Science, Technology and Application

2016 International Conference on Computer Science, Technology and Application [CSTA2016]

March 18th-20th, 2016

The 2016 International Conference on Computer Science, Technology and Application [CSTA2016] is the premier forum for the presentation of new advances and research results in the fields of computer science, technology and application. The conference brings together leading researchers, engineers and scientists from all over the world.

CSTA2016 is scheduled for March 18th – 20th, 2016 in Changsha, Hunan, China. All accepted papers will be published by World Scientific Publishing Company in the conference proceedings, and will be submitted for **EI** and **CPCI** index.

We are seeking for contributions addressing the applications enabled by all kinds of computer science

Please submit your papers via e-mail: csta2016@163.com, csta2016@vip.163.com

EasyChair: <https://easychair.org/conferences/?conf=csta2016>

Topics Computer System Structure and Hardware Computer Network and Information Security Software Testing and Tools (For more information, please consult our web page at http://www.csta2016.org/?op=callforpapers)	Technical Program Committee: Dr. Qianliu Li, Wenzhou University, China Dr. Hengqing Cang, Hohai University, China Dr. Xiu Xu, Shanghai Dian Ji University, China Dr. Lvben Wu, North China Institute Of Aerospace Engineering, China Dr. Zichen Ning, North China University of Technology, China Dr. Qiao Yuan, Shanxidatong University, China
Contact Email: csta2016@163.com Phone: 15818707441	

Notice: please include your phone number in your submission e-mail message.

CSTA2016 Organizers

2016 International Conference on Computer Science, Technology and Application

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»

№ 6(234) 2015

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*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 28.12.2015. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,55. Уч.-изд. л. 12,55. 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 — 6 номеров в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

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

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

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

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

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

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

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

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

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

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

2.3. Рассмотрение материалов

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

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

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

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

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

Более подробную информацию можно получить:

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

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

или по e-mail: infocom@spbstu.ru