



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

Том 11, № 1
2018

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Председатель

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН;

Редакционный совет:

Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;

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

Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Журнал с 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 ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory», в базах данных Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, Math-Net.Ru, ProQuest, Index Copernicus

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

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

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018



**ST. PETERSBURG STATE
POLYTECHNICAL UNIVERSITY
JOURNAL**

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

**Vol. 11, No. 1
2018**

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

EDITORIAL COUNCIL

Head of the editorial council

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

Members:

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

Prof. Dr. *Dmitry G. Arseniev*,

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

Prof. Dr. *Vladimir S. Zaborovsky*,

Prof. Dr. *Vladimir N. Kozlov*,

Prof. Dr. *Alexandr E. Fotiadi*,

Prof. Dr. *Igor G. Chernorutsky*.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

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

Members:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Содержание

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

Сивчек И.В. Модуляция дефазированием в последовательной схеме с компенсацией Ширекса в классе EF2.....	7
Краснов Ф.В., Буторин А.В., Михеенков А.В. Применение методов машинного обучения для реконструкции свойств отражающих плоскостей среды по сейсмическим данным	18
Кваснов А.В. Метод отождествления радиолокационных отметок целей от активных и пассивных станций с помощью Z-теста Фишера	28

Программное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

Черноруцкий И.Г., Котляров В.П. О реализации методов нелинейного программирования второго порядка на основе рекуррентных алгоритмов оценивания.....	39
Селиверстов Я.А., Гергель Г.Ю., Селиверстов С.А., Никитин К.В. Развитие интеллектуальных транспортных систем на основе мобильных технологий и процедур анализа социальной активности городского населения.....	47

Системный анализ и управление

Байдина Т.А., Бурдаков С.Ф. Управление автоколебаниями при контактном взаимодействии робота с обрабатываемой поверхностью в условиях нелинейного трения.....	65
---	----

Contents

Circuits and Systems for Receiving, Transmitting, and Signal Processing

Sivchek I.V. <i>Outphasing modulation in a series circuit with Chireix compensation in class EF2</i>	7
Krasnov F.V., Butorin A.V., Mikheyenkov A.V. <i>Reconstruction of medium reflectivity coefficients based on seismic data through machine learning</i>	18
Kvasnov A.V. <i>The method of identifying radar target marks from active and passive stations by means of Z-test</i>	28

Computer Software, Telecommunications, and Control Systems

Chernorutskiy I.G., Kotlyarov V.P. <i>Implementation of nonlinear programming second-order methods on the basis of recurrent estimation algorithms</i>	39
Seliverstov Ya.A., Gergel G.Yu., Seliverstov S.A., Nikitin K.V. <i>Improvement of intellectual transport systems by mobile technologies and procedures of analysis of social activity of urban population</i>	47

System Analysis and Control

Baidina T.A., Burdakov S.F. <i>Control of self-oscillations in contact interaction of a robot with a treated surface under nonlinear friction</i>	65
--	----

МОДУЛЯЦИЯ ДЕФАЗИРОВАНИЕМ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СХЕМЕ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ШИРЕКСА В КЛАССЕ EF_2

И.В. Сивчек

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

Представлена модель окончного каскада радиопередающего устройства для формирования сигналов с переменной амплитудой (сигналы с амплитудной, однополосной, квадратурной модуляцией), в основе которой лежит модуляция дефазированием с применением последовательной схемы сложения напряжений с компенсацией Ширекса в классе EF_2 . Показано свойство усилителя класса EF_2 сохранять высокий КПД при изменении комплексного сопротивления нагрузки в широких пределах. За счет этого в схеме дефазирования возможно добиться 15-кратного изменения выходной мощности от максимальной величины при сохранении высокого КПД. Благодаря более эффективному использованию активного элемента по мощности, чем в схеме модуляции дефазированием с компенсацией Ширекса в классе E , представленный окончный каскад может найти широкое применение как в радиовещательных (амплитудная модуляция и *DRM* в КВ диапазоне), так и в связных (*WCDMA* и *LTE*) передатчиках различных уровней выходной мощности и диапазонов рабочих частот.

Ключевые слова: радиопередающее устройство; окончный каскад; модуляция дефазированием; компенсация Ширекса; класс EF_2 .

Ссылка при цитировании: Сивчек И.В. Модуляция дефазированием в последовательной схеме с компенсацией Ширекса в классе EF_2 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 1. С. 7–17. DOI: 10.18721/JCSTCS.111101

OUTPHASING MODULATION IN A SERIES CIRCUIT WITH CHIREIX COMPENSATION IN CLASS EF_2

I.V. Sivchek

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

The paper presents a model of the radio transmitter output stage for generating signals with high peak-to-average ratio waveform (AM, single-sideband modulation, QAM), based on a series outphasing modulation circuit with Chireix compensation and class EF_2 power amplifiers (PAs). The property of the class EF_2 PA to maintain high efficiency when complex load resistance varies over a wide range is shown. It allows to preserve high efficiency of amplitude modulation at 15 times power back-off. Due to a higher power output capability than in a Chireix outphasing circuit with class

E PAs, the proposed circuit can be widely used in broadcasting (short wave AM and DRM) and communication (WCDMA and LTE) transmitters with different output power levels and frequency ranges.

Keywords: transmitter output stage; outphasing modulation; Chireix compensation; power amplifier (PA); class EF_2 .

Citation: Sivchek I.V. Outphasing modulation in a series circuit with Chireix compensation in class EF_2 . St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 1, Pp. 7–17. DOI: 10.18721/JCSTCS.11101

Введение

Использование сигналов с переменной амплитудой (например, сигналов с амплитудной или квадратурной модуляцией) ставит задачу обеспечения энергетически эффективной работы радиопередающего устройства в широком диапазоне выходных мощностей. Одним из способов достижения этой цели является использование метода дефазирования, который основывается на идее сложения моногармонических напряжений или токов с одинаковыми амплитудами и частотами, но различными фазами. При этом амплитуда суммы колебаний будет зависеть от разности фаз слагаемых. В качестве генераторов напряжений или токов в схеме дефазирования могут использоваться различные схемы усилителей: класса B [1], класса F [2], а также ключевые режимы класса D [3] и класса E [4].

Усилитель класса E [5], характеризующийся уменьшенными коммутационными потерями по сравнению с классом D , может сохранять высокий КПД в ограниченной области комплексного сопротивления нагрузки, тогда как дефазирование приводит к выходу из области высоких КПД. Для устранения этого недостатка в схеме дефазирования применяется компенсация Ширекса [6], за счет чего уменьшается область изменения комплексного сопротивления нагрузки каждого генератора.

Метод дефазирования с компенсацией Ширекса в классе E позволяет обеспечить высокую стабильность КПД при изменении выходной мощности передатчика, не требуя использования мощного модулятора, благодаря чему уменьшаются потери КПД передатчика, его массогабаритные показатели, а также стоимость. В настоящий момент

одной из основных сложностей использования данного метода является узкий поддиапазон рабочих частот, однако несмотря на это он находит применение как в радиовещательных передатчиках, формирующих сигналы с амплитудной модуляцией и *DRM* [7], так и в передатчиках базовых станций, используемых в системах мобильной связи стандартов *WCDMA* и *LTE* [8–11].

Идея, лежащая в основе данной работы, заключается в использовании усилителя класса EF_2 [12] вместо применявшегося ранее усилителя класса E в последовательной схеме дефазирования с компенсацией Ширекса. Выбор усилителя класса E обусловлен возможностью сохранять высокий КПД при уменьшении выходной мощности от максимальной величины. Как будет показано далее, аналогичным свойством обладает и усилитель класса EF_2 , позволяя при этом более эффективно использовать активный элемент по выходной мощности [13].

Цель работы – повышение эффектив-

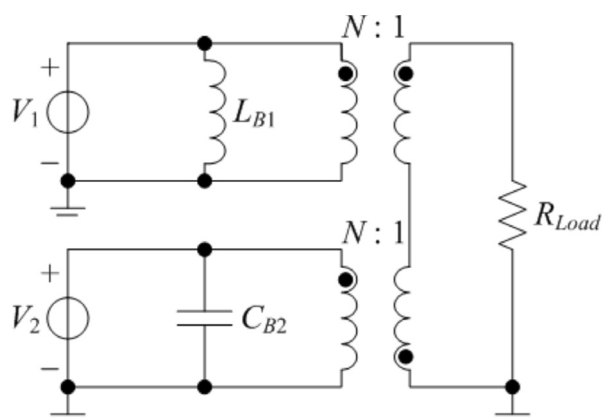


Рис. 1. Схема сложения напряжений с компенсирующими элементами

Fig. 1. Transformer-based Chireix combiner

ности использования активного элемента по выходной мощности в последовательной схеме дефазирования с компенсацией Ширекса.

Модуляция дефазированием с компенсацией Ширекса

На рис. 1 приведена схема сложения напряжений с компенсацией Ширекса, где V_1 и V_2 – генераторы моногармонических напряжений; L_{B1} и C_{B2} – компенсирующие элементы; R_{Load} – сопротивление нагрузки. В частотной области генераторы описываются выражениями

$$V_1(\psi) = V_{1m} \cdot (\cos(\psi) + i \sin(\psi)),$$

$$V_2(\psi) = V_{1m} \cdot (\cos(\pi - \psi) + i \sin(\pi - \psi)),$$

где V_{1m} – амплитуда колебания; ψ – фазовый сдвиг. Дополнительный сдвиг фазы на π в выражении для $V_2(\psi)$ не является обязательным, однако он обеспечивает прямую зависимость между фазой ψ и амплитудой суммы напряжений на нагрузке R_{Load} .

Выражения для комплексных сопротивлений нагрузки генераторов имеют следующий вид:

$$Z_1(\psi) = \frac{R_{Load \text{ Pr. } \Sigma} X_{B1} \cdot (2X_{B1} \sin^2(\psi) + i \cdot (R_{Load \text{ Pr. } \Sigma} - X_{B1} \sin(2\psi)))}{R_{Load \text{ Pr. } \Sigma}^2 - 2R_{Load \text{ Pr. } \Sigma} X_{B1} \sin(2\psi) + 4X_{B1}^2 \sin^2(\psi)},$$

$$X_{B1} = \omega L_{B1},$$

$$Z_2(\psi) = \frac{R_{Load \text{ Pr. } \Sigma} X_{B2} \cdot (2X_{B2} \sin^2(\psi) + i \cdot (R_{Load \text{ Pr. } \Sigma} + X_{B2} \sin(2\psi)))}{R_{Load \text{ Pr. } \Sigma}^2 + 2R_{Load \text{ Pr. } \Sigma} X_{B2} \sin(2\psi) + 4X_{B2}^2 \sin^2(\psi)},$$

$$X_{B2} = -\frac{1}{\omega C_{B2}}, \quad R_{Load \text{ Pr. } \Sigma} = N^2 R_{Load},$$

где ω – рабочая угловая частота; X_{B1} и X_{B2} – реактивные сопротивления компенсирующих элементов; N – коэффициент трансформации.

На рис. 2 показаны графики модулей комплексных сопротивлений и фаз на выходах генераторов. Применение компенсирующих элементов позволяет ограничить

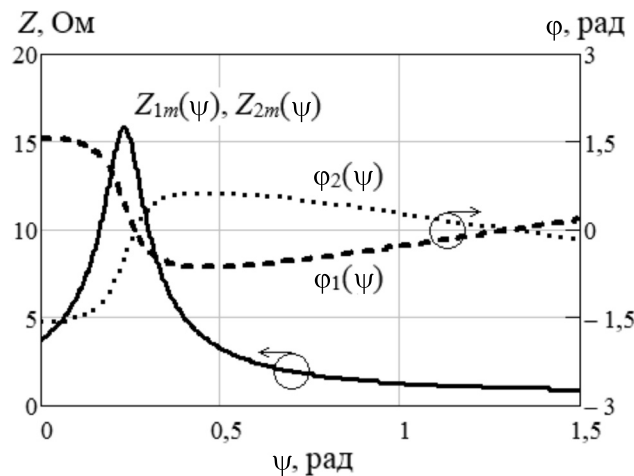


Рис. 2. Модули комплексных сопротивлений и фазы на выходах генераторов

$$R_{Load} = 1,866; X_{B1} = -X_{B2} = 3,732; N = 1$$

Fig. 2. Output complex impedances of the generators

$$R_{Load} = 1,866; X_{B1} = -X_{B2} = 3,732; N = 1$$

максимальные модули фаз по сравнению со схемой, в которой компенсирующие элементы отсутствуют. Обратим внимание на то, что нулевые фазы сопротивлений соответствуют не $\psi = \pi / 2$, а некоторым другим величинам ψ , зависящим от отношений величин реактивных сопротивлений компенсирующих элементов к сопротивлению нагрузки. Значения R_{Load} , X_{B1} , X_{B2} и N , выбранные в приведенном примере, будут использованы далее. Отметим, что при них действительная часть комплексных сопротивлений нагрузок $Re(Z_1(\psi)) = Re(Z_2(\psi)) = 1$, тогда как комплексная часть $Im(Z_1(\psi)) = Im(Z_2(\psi)) = 0$ при $\psi = 1,309$ рад.

Свойства усилителя класса EF_2

В качестве генераторов V_1 и V_2 в данной работе используются усилители класса EF_2 . Схема усилителя представлена на рис. 3, где E — источник питания; S_{AE} — активный элемент (АЭ), характеризующийся сопротивлением в проводящем состоянии r_{AE} ; L_b и C_b — разделительная индуктивность и емкость; L_{f1} и C_{f1} — элементы формирующего контура; L_{f2} и C_{f2} — элементы формирующего контура — фильтра второй гармоники рабочей частоты; $Z_c = R_c + iX_c$ — комплексное сопротивление нагрузки, которое отлично от нуля только на рабочей частоте усилителя. Такое сопротивление нагрузки означает, что на нагрузке генератора будет наблюдаться моногармоническое напряже-

ние — это условие применимости данного усилителя в качестве генератора напряжения в последовательной схеме дефазирования.

Для математического описания усилителя использовался метод гармонического баланса в матричной форме [14], позволяющий проводить расчет характеристик устройства в режиме установившихся колебаний. Математическая модель здесь получается аналогичной модели усилителя класса E [15], а выражение для вектора отсчетов напряжения на АЭ в режиме установившихся колебаний имеет схожий вид: $v_{AE} = \Gamma^{-1} \cdot (Y_{11} + \Gamma g_{AE} \Gamma^{-1})^{-1} (-Y_{12} V_2)$, где Γ и Γ^{-1} — матрицы прямого и обратного дискретного преобразования Фурье; Y_{11} и Y_{12} — матрицы, состоящие из Y -параметров пассивного линейного четырехполюсника; V_2 — вектор, описывающий источник питающего напряжения в частотной области; g_{AE} — диагональная матрица проводимостей активного элемента в течение периода колебаний. Количество элементов в векторах v_{AE} и V_2 равно $S = 2K - 1$, где S — число отсчетов за период колебаний, K — число гармоник. Матрицы Γ , Γ^{-1} , Y_{11} , Y_{12} и g_{AE} обладают размерностью $S \times S$. Развернутое описание математической модели здесь не приводится ввиду его объема и того, что оно не является целью данной работы.

Исследуем свойства усилителя класса EF_2 с некоторым набором параметров. Идеальный усилитель класса E обладает свой-

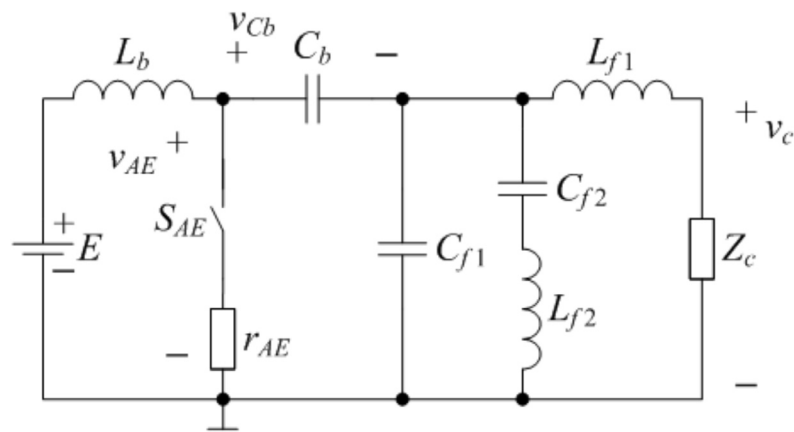


Рис. 3. Схема усилителя класса EF_2

Fig. 3. Circuit of the class EF_2 PA



ством отсутствия коммутационных потерь при 10-кратном изменении сопротивления нагрузки в случае, если реактивное сопротивление индуктивности в цепи питания L_b является величиной, соизмеримой с активным сопротивлением нагрузки. При этом в схеме дефазирования с компенсацией Ширекса, несмотря на наличие реактивной составляющей сопротивления нагрузки, усилители класса E позволяют сохранять высокий КПД при 10-кратном изменении выходной мощности.

Ввиду схожести схем и режимов работы, целесообразно проверить наличие такого свойства у усилителя класса EF_2 . Набор параметров следующий: период колебаний рабочей частоты $T = 2\pi$ с; нормированная к периоду рабочей частоты длительность проводящего состояния АЭ $t_{pn} = 0,354$; фазовый сдвиг между первыми гармониками напряжения и тока нагрузки настроенного усилителя $\phi_{VI} = 0$ рад; напряжение питания $E = 1$ В; сопротивление АЭ в проводящем состоянии $r_{AE} = 0,04$ Ом; активное сопротивление нагрузки настроенного усилителя $R_c = 1$ Ом; реактивное сопротивление индуктивности в цепи питания $X_{Lb} = 0,9$ Ом; реактивное сопротивление разделительной

емкости $X_{Cb} = 0,01$ Ом; реактивное сопротивление индуктивности 1 формирующего контура $X_{Lf1} = 0,314$ Ом; реактивное сопротивление емкости 1 формирующего контура $X_{Cf1} = 1,304$ Ом; реактивное сопротивление индуктивности 2 формирующего контура $X_{Lf2} = 1,303$ Ом; реактивное сопротивление емкости 2 формирующего контура $X_{Cf2} = 4X_{Lf2}$. Расчетный КПД составляет 92 %.

Благодаря выбору такого набора параметров, все напряжения в усилителе оказываются нормированными к напряжению питания, а все сопротивления нормированы к активному сопротивлению нагрузки настроенного усилителя. Разделительная емкость выбрана такой величины, что напряжение на ней в течение периода колебаний можно считать практически постоянным. Поскольку диапазоны изменения реактивных сопротивлений нагрузок в двух плечах схемы дефазирования с компенсацией Ширекса различны, исследование проводилось для обоих случаев. На рис. 4 представлены результаты расчетов. Как видно, при таком наборе параметров оба усилителя работают со сравнительно стабильным КПД в широком диапазоне выходных мощностей, что

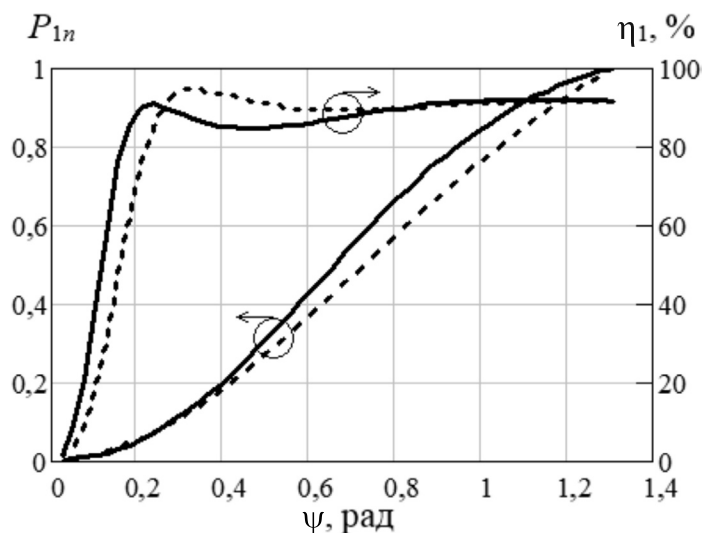


Рис. 4. Зависимость нормированной выходной мощности и КПД от фазового сдвига при дефазировании
(—) — плечо 1, (---) — плечо 2

Fig. 4. Normalized output power and efficiency vs. drive phase difference
(—) — PA 1, (---) — PA 2

позволяет рассчитывать на соответствующие результаты при моделировании схемы дефазирования.

Отметим, что коэффициент использования АЭ по мощности в данном настроенном усилителе равен 0,120, тогда как для аналогичного усилителя класса E , пригодного для работы в схеме дефазирования, он составит лишь 0,077.

Модуляция дефазированием в классе EF_2

Теперь приведем методику расчета схемы дефазирования с компенсацией Ширекса в классе EF_2 , изображенной на рис. 5, после чего исследуем ее свойства с помощью компьютерного моделирования. На выходе каждого плеча здесь установлен параллельный колебательный контур, который обеспечивает фильтрацию выходного напряжения, за счет чего приближенно выполняется условие его моногармоничности, необходимое для того, чтобы рассмотрен-

ные выше математические модели схемы дефазирования (см. рис. 1) и усилителя класса EF_2 (см. рис. 3) можно было применить для описания объединяющего их устройства. Отметим также, что параллельный контур позволил добиться лучших, чем П-контур, результатов при работе в полосе частот. Компенсация Ширекса осуществляется за счет уменьшения и увеличения емкостей этих контуров. Функцию согласования схемы дефазирования с нагрузкой здесь выполняет трансформатор. Параллельно каждому АЭ установлен диод обратного тока, что имитирует случай использования *MOSFET*.

Методика расчета. Все нормированные сопротивления нормированы к активному сопротивлению на выходе плеча настроенного усилителя. Все нормированные напряжения нормированы к напряжению питания.

Нормированные величины: нормиро-

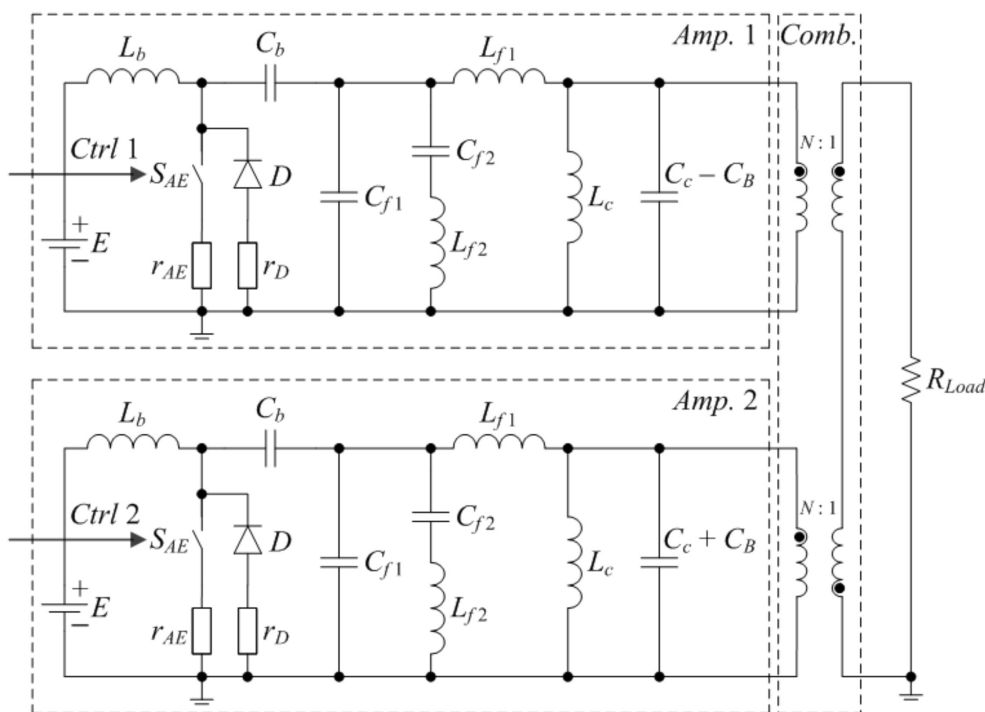


Рис. 5. Схема оконечного каскада для модуляции дефазированием с компенсацией Ширекса в классе EF_2

Amp. 1 – усилитель 1; *Amp. 2* – усилитель 2; *Comb.* – устройство сложения мощностей;
Ctrl 1 – управляющее колебание 1; *Ctrl 2* – управляющее колебание 2

Fig. 5. Circuit of the transformer-based Chireix combiner with the class EF_2 PAs
Amp. 1 – PA 1, *Amp. 2* – PA 2, *Comb.* – power combiner, *Ctrl 1* – control waveform 1, *Ctrl 2* – control waveform 2



ванная к периоду рабочей частоты длительность проводящего состояния АЭ $t_{pn} = 0,354$; нормированное сопротивление АЭ в проводящем состоянии $r_{AE_n} = 0,04$; нормированное сопротивление диода в проводящем состоянии $r_{D_n} = 0,04$; нормированное реактивное сопротивление индуктивности в цепи питания $X_{Lb_n} = 0,9$; нормированное реактивное сопротивление разделительной емкости $X_{Cb_n} = 0,01$; нормированное реактивное сопротивление индуктивности 1 формирующего контура $X_{Lf1_n} = 0,314$; нормированное реактивное сопротивление емкости 1 формирующего контура $X_{Cf1_n} = 1,304$; нормированное реактивное сопротивление индуктивности 2 формирующего контура $X_{Lf2_n} = 1,303$; нормированная амплитуда первой гармоники напряжения на выходе плеча настроенного усилителя $V_{clm_n} = 1,106$; угол дефазирования, соответствующий настроенным режимам работы усилителей при нулевых реактивных сопротивлениях нагрузок, $\psi_m = 1,309$ рад; нормированное сопротивление нагрузки $R_{Load_n} = 1,866$; модуль реактивного сопротивления компенсирующего элемента $X_{B_n} = 3,732$; добротность параллельных контуров $Q_c \approx 10$.

Исходные данные для расчета: частота настройки f_0 ; рабочая частота f ; напряжение питания E ; первая гармоника максимальной выходной мощности в нагрузке P_{Load1} ; добротность выходных параллельных контуров Q_c ; фазовый сдвиг ψ ; коэффициент трансформации N .

Расчет:

Угловая частота настройки $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Период колебаний на рабочей частоте $T = 1/f$.

Длительность проводящего состояния АЭ $t_p = t_{pn} T$.

Задержка отпирающего АЭ импульса при дефазировании $t_d = T\psi / (2\pi)$.

Первая гармоника максимальной мощности на выходе одного плеча $P_{c1} = P_{Load1} / 2$.

Амплитуда первой гармоники напряжения (и максимальное напряжение) на выходе одного плеча в режиме максимальной выходной мощности $V_{clm} = V_{clm_n} E$.

Активное сопротивление на выходе одного плеча в режиме максимальной вы-

ходной мощности $R_c = V_{clm}^2 / (2P_{c1})$.

Сопротивление АЭ в проводящем состоянии $r_{AE} = r_{AE_n} R_c$.

Сопротивление диода в проводящем состоянии $r_D = r_{D_n} R_c$.

Индуктивность в цепи питания $L_{b_n} = X_{Lb_n} R_c / \omega_0$.

Разделительная емкость $C_{b_n} = 1 / (\omega_0 X_{Cb_n} R_c)$.

Индуктивность 1 формирующего контура $L_{f1} = X_{Lf1_n} R_c / \omega_0$.

Емкость 1 формирующего контура $C_{f1} = 1 / (\omega_0 X_{Cf1_n} R_c)$.

Индуктивность 2 формирующего контура $L_{f2} = X_{Lf2_n} R_c / \omega_0$.

Емкость 2 формирующего контура $C_{f2} = 1 / (4 \omega_0 X_{Lf2_n} R_c)$.

Индуктивность параллельного контура $L_c = R_c / (Q_c \omega_0)$.

Емкость параллельного контура $C_c = Q_c / (\omega_0 R_c)$.

Сопротивление нагрузки $R_{Load} = R_{Load_n} R_c / N^2$.

Компенсирующая емкость $C_B = 1 / (\omega_0 X_{B_n} R_c)$.

Параметры управляющего колебания 1: период T , длительность отпирающего импульса t_p , задержка отпирающего импульса $t_{d1} = T / 2 - t_d$.

Параметры управляющего колебания 2: период T , длительность отпирающего импульса t_p , задержка отпирающего импульса $t_{d2} = T / 2 + t_d$.

Моделирование. Рассмотрим абстрактный пример, не привязываясь к конкретной модели АЭ и области применения конечного каскада. Исходные данные для расчета: частота настройки $f_0 = 1$ Гц; рабочая частота $f = 0,95 f_0, 1,00 f_0, 1,05 f_0$; напряжение питания $E = 1$ В; первая гармоника максимальной выходной мощности в нагрузке $P_{Load1} = 1$ Вт; добротность выходного параллельного контура $Q_c = 10$; фазовый сдвиг $\psi = 0 \dots 1,309$ рад; коэффициент трансформации $N = 1$.

На рис. 6 приведены данные моделирования схемы дефазирования на трех рабочих частотах. Из результатов видно, что на частоте настройки устройство сохраняет КПД около 90 % при 15-кратном изменении выходной мощности. Хорошие

результаты видны для случая ниже частоты настройки: КПД свыше 90 % обеспечивается при 7-кратном уменьшении выходной мощности относительно максимальной величины. При частоте выше частоты настройки результаты несколько хуже: КПД свыше 90 % получается лишь при 2-кратном уменьшении выходной мощности относительно максимальной величины. Таким образом, полученные результаты показывают возможность работы данного устройства с коэффициентом перекрытия поддиапазона частот 1,05 ... 1,10. Отметим также, что во всех установившихся режимах колебаний, которые были получены для построения приведенных зависимостей, максимальное напряжение на АЭ не превышает 2,7 от величины напряжения питания, тогда как в

случае использования усилителей класса *E* при тех же исходных данных для расчета, оно превышает 4,2.

Оценка максимальных величин токов АЭ в данном случае малопоказательна, поскольку пиковые значения, наблюдаемые при скачкообразном изменении напряжения на АЭ в момент его перехода в проводящее состояние, в реальном устройстве будут существенно зависеть от паразитных индуктивностей силовых выводов АЭ. Кроме того, если применяются *MOSFET*, то, с учетом их перегрузочной способности, целесообразно использовать среднеквадратическое значение тока за период колебаний, а для оценки эффективности использования АЭ по мощности — модифицированный коэффициент мощности [13].

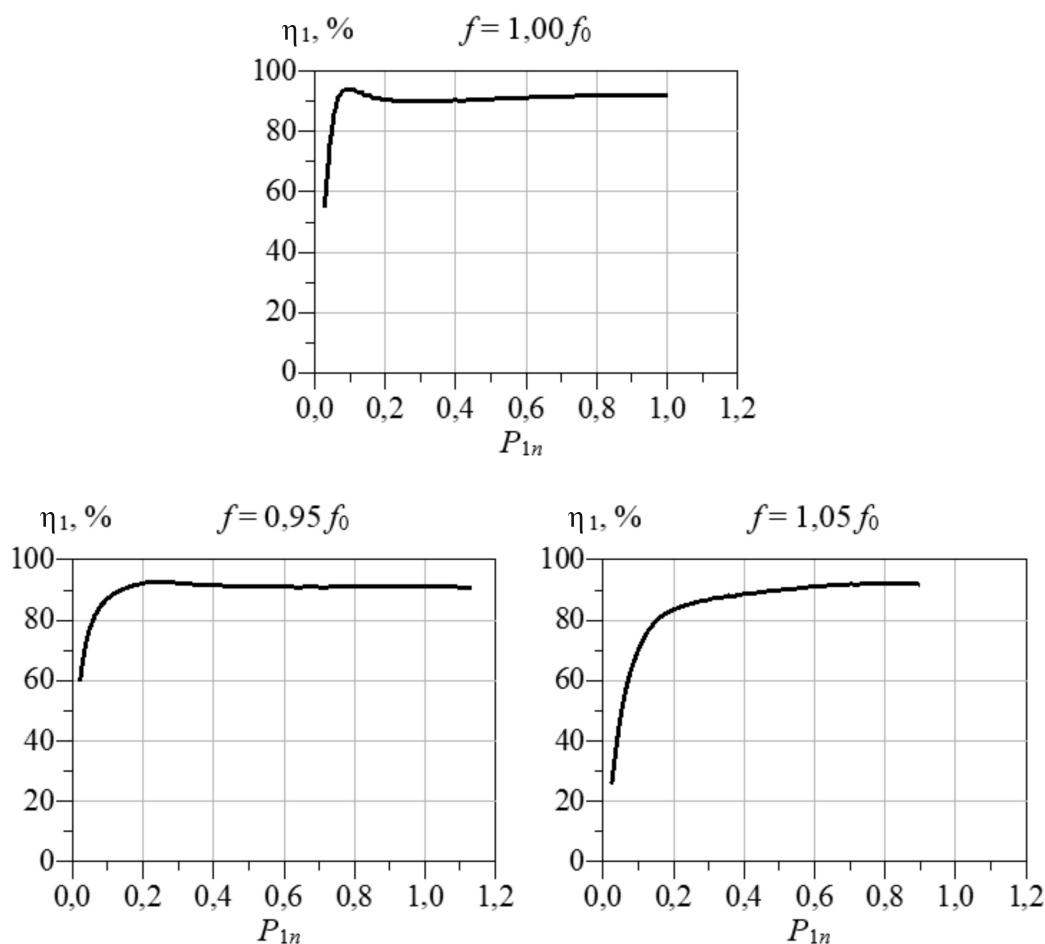


Рис. 6. Зависимость КПД по первой гармонике от нормированной первой гармоники выходной мощности на различных частотах

Fig. 6. Efficiency vs. normalized output power for different frequencies



В данном случае, при работе в полосе частот будем считать его по формуле $c_{pmr} = P_{load1\ mm} / (2v_{AE\ max} i_{AE\ rms})$, где $P_{load1\ mm}$ — минимальная из максимальных выходных мощностей в полосе частот; $v_{AE\ max}$ — максимальное напряжение на АЭ из всех режимов на всех частотах; $i_{AE\ rms}$ — максимальный среднеквадратичный ток АЭ из всех режимов на всех частотах. Для рассмотренного оконечного каскада $c_{pmr} = 0,157$. В случае использования усилителей класса E данный коэффициент уменьшится до 0,111. Таким образом, по показателю модифицированного коэффициента мощности при работе в полосе частот, предложенная схема позволяет на 40 % эффективнее использовать АЭ.

Заключение

Предложенные в работе схема и расчетные данные могут использоваться при разработке радиопередающих устройств различного назначения, от которых требуется обеспечивать формирование сигнала с переменной амплитудой в узкой полосе рабочих частот. В частности, могут приме-

няться в радиовещательных передатчиках с амплитудной модуляцией и *DRM*, а также в передатчиках систем мобильной связи стандартов *WCDMA* и *LTE* с учетом адаптации схемы под соответствующий диапазон частот. Это представляет практический интерес, учитывая на 40 % более высокую эффективность использования АЭ по мощности и в полтора раза больший диапазон выходных мощностей при стабильно высоком КПД по сравнению с аналогичной схемой на основе усилителей класса E , которая, в свою очередь, уже нашла применение на практике.

Дальнейшая работа по данной схеме может быть направлена на поиск параметров усилителя класса EF_2 и его нагрузочной цепи, обеспечивающих более широкую полосу рабочих частот. При практической реализации потребуется решение задачи обеспечения линейности модуляции с учетом работы в полосе частот. Кроме того, представляет интерес исследование параллельной схемы (схемы сложения токов) дефазирования с компенсацией Ширекса в классе EF_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hakala I., Choi D.K., Gharavi L., Kajakine N., Koskela J., Kaunisto R.** A 2.14-GHz Chireix outphasing transmitter // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. June 2005. Vol. 53. Iss. 6. Pp. 2129–2138. DOI: 10.1109/TMTT.2005.848770
2. **Hwang T., Azadet K., Wilson R.S., Lin J.** Nonlinearity modeling of a Chireix outphasing power amplifier // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. Dec. 2015. Vol. 62. Iss. 12. Pp. 2898–2907. DOI: 10.1109/TCSI.2015.2485718
3. **Lee S., Nam S.** A CMOS outphasing power amplifier with integrated single-ended Chireix combiner // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. June 2010. Vol. 57. Iss. 6. Pp. 411–415. DOI: 10.1109/TCSII.2010.2048353
4. **Ghahremani A., Annema A.-J., Nauta B.** A 20 dBm outphasing class E PA with high efficiency at power back-off in 65nm CMOS technology // *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp.* Honolulu, HI, USA. June 2017. Pp. 340–343. DOI: 10.1109/RFIC.2017.7969087
5. **Sokal N.O., Sokal A.D.** Class E — a new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. June 1975. Vol. 10. Iss. 3. Pp. 168–176. DOI: 10.1109/JSSC.1975.1050582
6. **Chireix H.** High power outphasing modulation // *Proc. of the Institute of Radio Engineers*. Nov. 1935. Vol. 23. No. 11. Pp. 1370–1392. DOI: 10.1109/JRPROC.1935.227299
7. **Ampegon.** Solid-State Shortwave Transmitter Line // URL: http://ampegon.com/download/20160727_leaflet_solid-state_shortave_transmitter_1.pdf (Дата обращения: 31.01.2018).
8. **Heijden M.P. van der, Acar M., Vromans J.S., Calvillo-Cortes D.A.** A 19W high-efficiency wide-band CMOS-GaN class-E Chireix RF outphasing power amplifier // *IEEE MTT-S Internat. Microwave Symp. Digest*. Baltimore, MD, USA. June 2011. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2011.5972564
9. **Calvillo-Cortes D.A., et al.** A package-integrated Chireix outphasing RF switch-mode high-power amplifier // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Oct. 2013. Vol. 61. Iss. 10. Pp. 3721–3732. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2279372
10. **Banerjee A., Hezar R., Ding L. Haroun B.**

A 29.5 dBm class-E outphasing RF power amplifier with efficiency and output power enhancement circuits in 45nm CMOS // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Aug. 2017, Vol. 64, Iss. 8, Pp. 1977–1988. DOI: 10.1109/TCSI.2017.2695243

11. **Du S., Zhu X.** A low-power CMOS class-E Chireix RF outphasing power amplifier for WLAN applications // *Wireless Personal Communications*, Oct. 2016, Vol. 90, Iss. 3, Pp. 1547–1561.

12. **Kee S.D., Aoki I., Hajimiri A., Rutledge D.** The class-E/F family of ZVS switching amplifiers // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, June 2003, Vol. 51, Iss. 6, Pp. 1677–1690. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812564

13. **Kaczmarczyk Z.** High-efficiency class E, EF₂, and E/F₃ inverters // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Oct. 2006, Vol. 53, No. 5, Pp. 1584–1593. DOI: 10.1109/TIE.2006.882011

14. **Maas S.A.** *Nonlinear Microwave and RF Circuits*, 2nd ed. Artech House, 2003, 608 p.

15. **Sivchek I.V.** Mathematical model of class E amplifier based on the harmonic balance method // *Internat. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*, Saratov, Russia, Sept. 2016, Vol. 1, Pp. 135–139. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878867

16. **Sivchek I.V.** Mathematical model of class E amplifier based on the harmonic balance method // *Internat. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*, Saratov, Russia, Sept. 2016, Vol. 1, Pp. 135–139. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878867

Статья поступила в редакцию 09.02.2018.

REFERENCES

1. **Hakala I., Choi D.K., Gharavi L., Kajakine N., Koskela J., Kaunisto R.** A 2.14-GHz Chireix outphasing transmitter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, June 2005, Vol. 53, Iss. 6, Pp. 2129–2138. DOI: 10.1109/TMTT.2005.848770

2. **Hwang T., Azadet K., Wilson R.S., Lin J.** Nonlinearity Modeling of a Chireix Outphasing Power Amplifier. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Dec. 2015, Vol. 62, Iss. 12, Pp. 2898–2907. DOI: 10.1109/TCSI.2015.2485718

3. **Lee S., Nam S.** A CMOS outphasing power amplifier with integrated single-ended Chireix combiner. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, June 2010, Vol. 57, Iss. 6, Pp. 411–415. DOI: 10.1109/TCSII.2010.2048353

4. **Ghahremani A., Annema A.-J., Nauta B.** A 20 dBm outphasing class E PA with high efficiency at power back-off in 65nm CMOS technology. *2017 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, Honolulu, HI, USA, June 2017, Pp. 340–343. DOI: 10.1109/RFIC.2017.7969087

5. **Sokal N.O., Sokal A.D.** Class E – a new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, June 1975, Vol. 10, Iss. 3, Pp. 168–176. DOI: 10.1109/JSSC.1975.1050582

6. **Chireix H.** High power outphasing modulation. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, Nov. 1935, Vol. 23, No. 11, Pp. 1370–1392. DOI: 10.1109/JRPROC.1935.227299

7. **Ampegon.** Solid-State Shortwave Transmitter Line. Available: http://ampegon.com/download/20160727_leaflet_solid-state_shortave_transmitter_1.pdf (Accessed: 31.01.2018).

8. **Heijden M.P. van der, Acar M., Vromans J.S., Calvillo-Cortes D.A.** A 19W high-efficiency wide-band CMOS-GaN class-E

Chireix RF outphasing power amplifier. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Baltimore, MD, USA, June 2011, Pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2011.5972564

9. **Calvillo-Cortes D.A., et al.** A package-integrated Chireix outphasing RF switch-mode high-power amplifier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Oct. 2013, Vol. 61, Iss. 10, Pp. 3721–3732. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2279372

10. **Banerjee A., Hezar R., Ding L., Haroun B.** A 29.5 dBm class-E outphasing RF power amplifier with efficiency and output power enhancement circuits in 45nm CMOS. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Aug. 2017, Vol. 64, Iss. 8, Pp. 1977–1988. DOI: 10.1109/TCSI.2017.2695243

11. **Du S., Zhu X.** A low-power CMOS class-E Chireix RF outphasing power amplifier for WLAN applications. *Wireless Personal Communications*, Oct. 2016, Vol. 90, Iss. 3, Pp. 1547–1561.

12. **Kee S.D., Aoki I., Hajimiri A., Rutledge D.** The class-E/F family of ZVS switching amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, June 2003, Vol. 51, Iss. 6, Pp. 1677–1690. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812564

13. **Kaczmarczyk Z.** High-efficiency class E, EF₂, and E/F₃ inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Oct. 2006, Vol. 53, No. 5, Pp. 1584–1593. DOI: 10.1109/TIE.2006.882011

14. **Maas S.A.** *Nonlinear Microwave and RF Circuits*, 2nd ed., Artech House, 2003, 608 p.

15. **Sivchek I.V.** Mathematical model of class E amplifier based on the harmonic balance method. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*, Saratov, Russia, Sept. 2016, Vol. 1, Pp. 135–139. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878867

Received 09.02.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

Сивчек Игорь Владимирович
Sivchek Igor V.
E-mail: cotgreat@gmail.com

DOI: 10.18721/JCSTCS.11102

UDC 316.452

RECONSTRUCTION OF MEDIUM REFLECTIVITY COEFFICIENTS BASED ON SEISMIC DATA THROUGH MACHINE LEARNING

F.V. Krasnov¹, A.V. Butorin¹, A.V. Mikheyenkov²

¹Gazpromneft STC, St. Petersburg, Russian Federation

²Institute for High Pressure Physics RAS, Moscow, Troitsk, Russian Federation

Geological models of Digital oil fields (DoF) require information about structural properties of subsurface media. 3D models of structural properties of subsurface media are based on data from field seismic survey. Seismic survey is one of the few universal geophysical methods of obtaining information of the Earth subsurface. A reflected signal as a part of seismic data provides information of the properties of a medium through which it has passed. Reflectivity coefficients are determined by fluctuation of the medium's elastic properties and serve as a basis for interpretation of seismic data as well as for prediction of geological structures. We have developed a new method of processing seismic data which allows to locate reflecting planes and compute values of reflectivity coefficients with high degree of precision. To resolve this problem, we have used the Semi-supervised learning method. The machine learning method made it possible to develop a mathematical model, optimize its parameters for synthetic data in order to further use the model for unmarked-up seismic data. The main novelty is in developing a learning algorithm using signal convolution and reflectivity coefficients' regularization. The model we have developed demonstrated high precision for synthetic seismic data with high density of reflecting planes (103 planes per a second of trace). The resulting low level of errors allows significant improving of quantitative understanding of the subsurface structure based on seismic data and is a firm basis for building geological models.

Keywords: seismic data; machine learning; optimization problem; reflection plane position; signal processing; dictionary learning.

Citation: Krasnov F.V., Butorin A.V., Mikheyenkov A.V. Reconstruction of medium reflectivity coefficients based on seismic data through machine learning. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 1, Pp. 18–27. DOI: 10.18721/JCSTCS.11102

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ СВОЙСТВ ОТРАЖАЮЩИХ ПЛОСКОСТЕЙ СРЕДЫ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Ф.В. Краснов¹, А.В. Буторин¹, А.В. Михеенков²

¹Научно-технический центр «Газпром нефть»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

²Институт физики высоких давлений имени Л.Ф. Верещагина РАН,
Москва, г. Троицк, Российская Федерация

Геологические модели месторождения создаются с использованием информации о структурных свойствах среды. Получение свойств среды в трехмерном



виде основано на данных об исследовании площади месторождения с помощью сейсморазведки. Коэффициенты отражения среды определяются изменением упругих свойств среды и являются основой для интерпретации сейсмических данных, а также прогноза геологического строения. В статье описан новый метод обработки сейсмических данных, который позволяет определить положение отражающих плоскостей и значения коэффициентов отражения с высокой точностью. Для решения задачи использована методика машинного обучения. Применение методов машинного обучения позволило создать математическую модель, оптимизировать ее параметры на синтетических данных для дальнейшего применения на неразмеченных сейсмических данных. Основным новшеством стала разработка алгоритма обучения, использующего свертку сигнала и регуляризацию коэффициентов отражения. Полученная модель показала высокую точность на синтетических сейсмических данных с высокой плотностью отражающих плоскостей.

Ключевые слова: сейсмические данные; методы машинного обучения; оптимизационная задача; положение отражающих плоскостей; обработка сигналов.

Ссылка при цитировании: Краснов Ф.В., Буторин А.В., Михеенков А.В. Применение методов машинного обучения для реконструкции свойств отражающих плоскостей среды по сейсмическим данным // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 1. С. 18–27. DOI: 10.18721/JCSTCS.111102

Introduction

Modern methods of retrieving decomposition coefficients for signal with known components are based on the Matching Pursuit approach which is proposed in the work [1], such as Batch Orthogonal Matching Pursuit [2], Stabilized Orthogonal Matching Pursuit [3] and Hierarchical Matching Pursuit [4].

Let us take a closer look at Matching Pursuit based algorithms for purposes of seismic surveys data. The OMP algorithm [2] solves the problem of finding decomposition coefficients for a reference signal based on a dictionary (for example with wavelets [5, 6]). Whereby the

OMP algorithm is based on a concept of residual decomposition error.

The result of OMP algorithm's functioning in Fig. 1 leads to achieving a very high precision of signal decomposition into sparse coefficients for a preset dictionary. To demonstrate the advantages and disadvantages of the OMP algorithm for purposes of seismic data, let us make a dictionary D of one 30 Hz Ricker wavelet. The resulting dictionary is shown in Fig. 2.

It should be noted that this dictionary has been made for 250 samples long traces with 2 ms sample rate. Using the OMP algorithm and such a dictionary, we can find same shape

Data: Dictionary D , signal T , target sparsity K

Result: Sparse representation γ such as $T \approx \check{T} = D \cdot \gamma$

Initial: Set $I = \emptyset$, $r = T$, $\gamma = 0$

While required sparsity not reached **do:**

| $\hat{k} = \operatorname{argmax}_k (d_k^T \cdot r)$

| $I = (I, \hat{k})$

| $\gamma_I = (D_I^+ \cdot T)$

| $r = T - D_I \cdot \gamma_I$

End

Fig. 1. OMP algorithm based on [2]

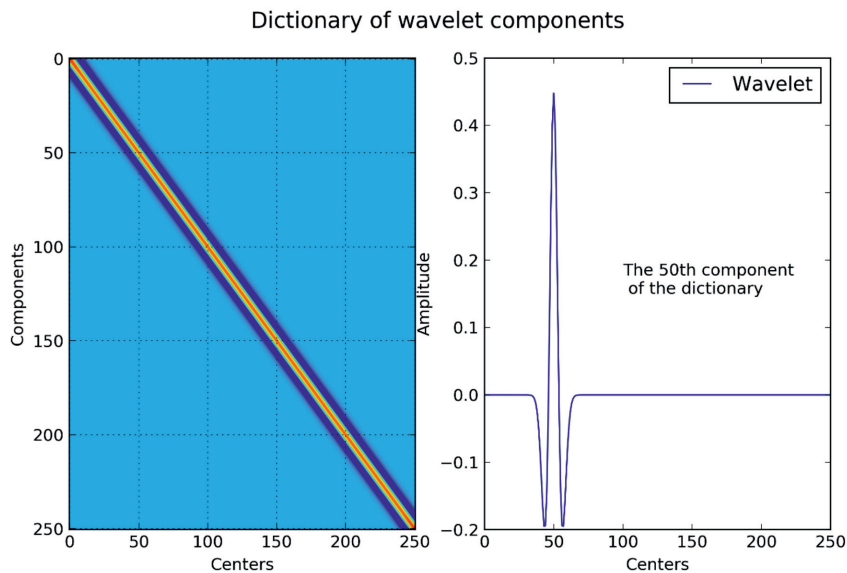


Fig. 2. Dictionary of 30 Hz wavelets.
One wavelet of the dictionary component No. 50 is shown on the right side

wavelets on each of 250 samples of a trace. The OMP algorithm determines the sparse coefficient for each wavelet of the dictionary for a particular seismic trace (signal).

Let us have a closer look at the particulars of the resulting OMP decomposition based on the dictionary D (Fig. 2) on one seismic trace's example.

Fig. 3 shows one seismic trace resulted from convolution of the medium reflection coefficients and the 30 Hz Ricker wavelet. Further, a condition of nonzero coefficients [7] of decomposition was used for decomposition of the synthetic trace by OMP method and the root-mean-square error (RMSE) was measured. As we can see the decomposition error is quite significant (145.07) for five coefficients (Fig. 3 b), although initially the synthetic trace has been built based on these five reflection coefficients.

In this work [2] it is recommended to use the number of decomposition coefficients equal to 10 % of a signal length. If the trace is 250 samples long it means 25 coefficients. As the number of decomposition coefficients is increased to 25 (Fig. 3 c), the trace reconstruction error becomes more admissible (10.67); however, decomposition coefficients and synthetic reflection coefficients still do not match.

In the result of decomposition into 50 nonzero coefficients (Fig. 3 d) within the OMP algorithm, there are many small coefficients, which decrease the RMSE but do not change the already selected coefficients.

Insufficient precision and emergence of fake reflecting planes make decomposition into coefficients based on the dictionary with the OMP unacceptable for the purposes of retrieving reflectivity coefficients. Thus, we can make a preliminary conclusion of the non-physical nature of decomposition coefficients resulting from using the OMP algorithm.

This study is focused on searching a wavelet composition which would minimize trace reconstruction error with preset position of coefficients.

We have come up with the following research hypothesis:

Hypothesis

There is an algorithm of seismic trace decomposition into decomposition coefficients, which quite precisely match medium reflectivity coefficients in terms of quantity, amplitude and position on a trace.

Further, we have explored the feasibility of building algorithms using machine learning methods, have developed the learning method

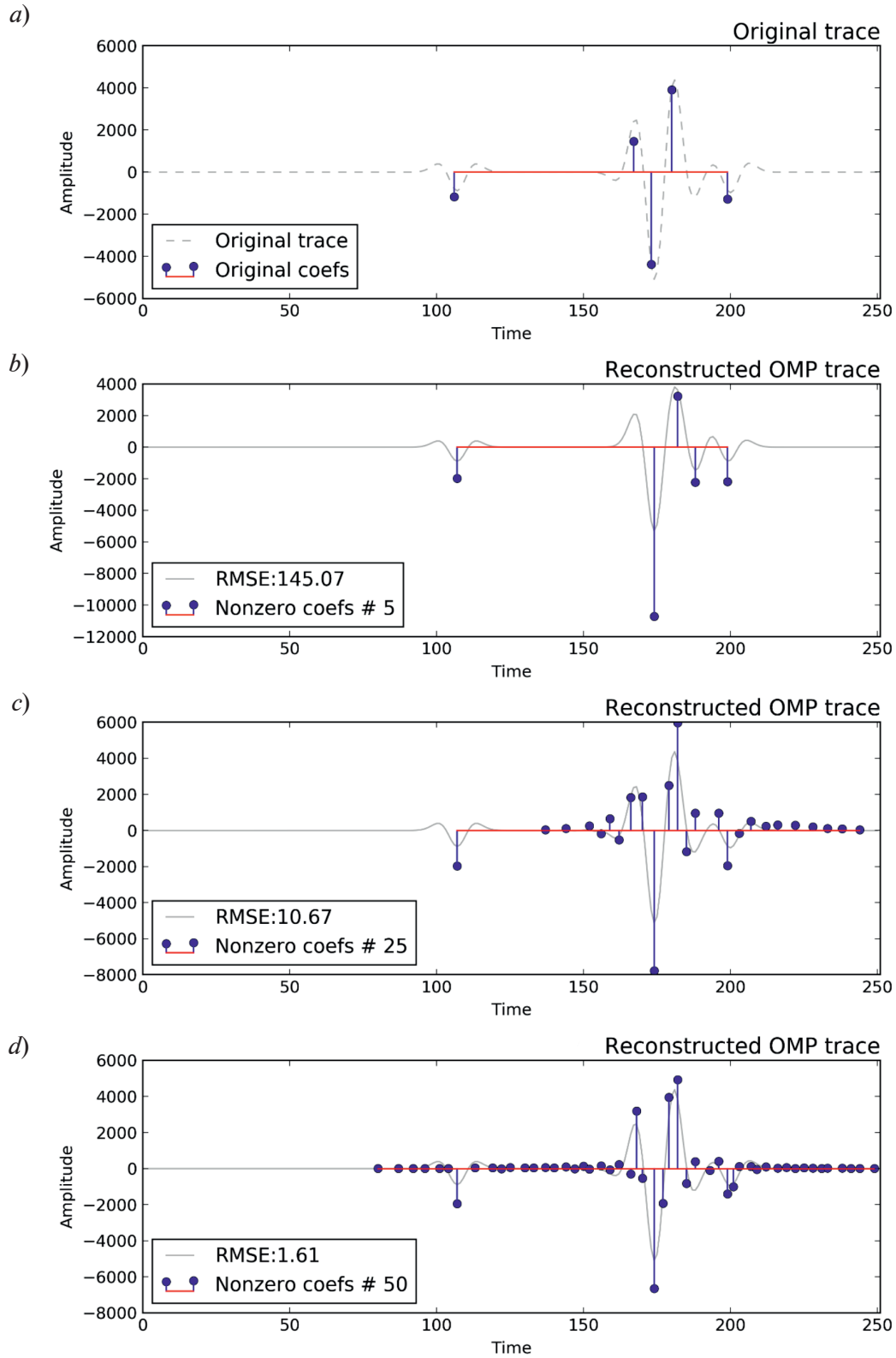


Fig. 3. The figure *a* shows a synthetic trace. Figs *b*, *c*, *d* show the coefficients resulting from the OMP decomposition and the traces reconstructed based on these coefficients

with consideration to a medium's physical properties and have performed several digital experiments on synthetic seismic traces.

This article is composed of introduction, methodological part, experiment outcome and conclusion.

Method

According to [8], the problem we are going to solve in this study falls into the category of inverse coefficient problems. Suppose a process studied through experiment can be modeled by the problem's solution:

$$L_0[u] = g(x, \theta), \quad x \in X \subset \mathbb{R}^K \quad (1)$$

with additional settings

$$l_0[u] = h(x, \theta), \quad x \in \delta X. \quad (2)$$

Here is the set of so-called controllable variables $x = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, $\theta \in \Omega$ a set of certain parameters, $L_0[\cdot]$ is the determined differential operator depending on θ , $\mathbb{R}^K$ is the Euclidean space with K dimensions, δX is the boundary of a set X .

In practice variables θ are unknown which leads to the following inverse problem: to evaluate initial parameters θ and response $u = (x, \theta)$ function for the equations (1), (2) based on experimental data if the experiment produces some functional $b[u]$ of response u .

In this study only seismic traces and a wavelet are available as experimental data based on which it is necessary to find a medium's reflectivity coefficients with acceptable degree of precision.

To solve this problem we have used the machine learning method. Machine learning approach for geophysics tasks was used in our previous study [8].

A synthetic trace constructed based on the preset synthetic reflection coefficients is used as marked up data. The algorithm learns to select decomposition coefficients matching synthetic coefficients based on which synthetic trace is constructed. An algorithm, named $\mathcal{A}_0$, learns to select reflection coefficients based on seismic trace. Labeled data in this case are the synthetic reflection coefficients based on which trace was created.

Formally the inverse problem is defined as follows: there is a discrete synthetic signal (trace) shown as a vector $T \in \mathbb{R}^N$. Trace T

is constructed using the Ricker wavelet W and K reflecting planes through convolution function. Each reflecting plane k is defined by a discrete number $t \in \mathbb{N}^K$ and a certain reflection coefficient $r \in \mathbb{R}^K$. Then the process of constructing a trace can be described by the following equation:

$$T = \sum_i^K W(t_i) * r_i. \quad (3)$$

Based on the trace T data only it is required to develop an algorithm $\mathcal{A}_0$ which would determine that reflection coefficients $\tau \in \mathbb{N}^M$ and $\rho \in \mathbb{R}^M$ meet the following criteria:

1. $\check{T} \approx T$, где $\check{T} = \sum_i^M W(\tau_i) * \rho_i$
2. $K \approx M$
3. $\tau \approx t$
4. $r \approx \rho$

Let us have a closer look at criteria 1-4 from the point of view of quantitative evaluation of errors E_{1-4} . Error E_1 is the degree of mismatch of two traces and is computed as Root-mean-square deviation, $\text{RMSE}\left(T, \check{T}\right)$. Deviation in

the number of initial and resulting reflection planes (E_2) is measured as a module of their difference, $\text{abs}(K-M)$. Wiggle of the reflecting planes' positions (E_3) is determined through F1-score metrics. Differences in amplitudes of reflection coefficients (E_4) are computed only for the reflecting planes fitting the positions $\text{RMSE}\left(T[t = \tau], \check{T}[t = \tau]\right)$.

Errors E_{2-4} are quantitative evaluations of the algorithm's functioning but cannot be applied to optimization ones. In order to find an optimal solution it is necessary to vary the reflection coefficients to minimize the E_1 error.

In addition to the condition of the E_1 error minimization, we also include the following physical criteria in the optimization process:

- Reflecting planes should not be too close to each other (U_1);
- Number of reflecting planes should be minimal (U_2).

Physical criteria U_1 and U_2 are quantified as penalty functions $F_1(U_1)$, $F_2(U_2)$ in the appraisal of optimization progress. Thus, a meta-algorithm of optimization can be described as

Data: Select initial values for reflecting planes ρ, τ
Result: Reflection coefficients of trace T
Hyperparameter: Learning Rate $l = \text{linspace}(10^{-2}, 1)$
While $Loss \rightarrow \min$ **do:**

$$\check{T} = \sum_i^M W(\tau_i) * \rho_i$$

$$\rho_i = \rho_i + l * \text{Grad} \left(T, \check{T} \right)$$

$$Loss = \sqrt{\frac{\left(T - \check{T} \right)^2}{\dim(T)}} + \left(\begin{matrix} F_1(U_1) \\ F_2(U_2) \end{matrix} \right)_{l_2}$$

End

Fig. 4. Meta-algorithm of optimization $\mathcal{A}0$

follows (Fig. 4).

The algorithm $\mathcal{A}0$ uses the information of traces mistie to determine direction and scope of reflecting planes' modulation. For this reason $\mathcal{A}0$ can fall into the category of variable optimization algorithms aimed at searching for a global minimum. The heuristic approaches to the optimization problem based on the work [6] and tested by us have proven less efficient.

Experiment outcome

To check the above-mentioned method we have performed experiments with synthetic

traces of various density of reflecting planes. Based on the outcome of the experiments optimal values of learning rate, gravity of penalties from U_1 and U_2 have been determined.

Initialization of a vector of reflecting planes has been studied separately. Three types of initialization have been tested:

- Initialization by random numbers in normal distribution;
- Initialization by trace amplitude values with a scale factor;
- Initialization by trace's extremes amplitudes.

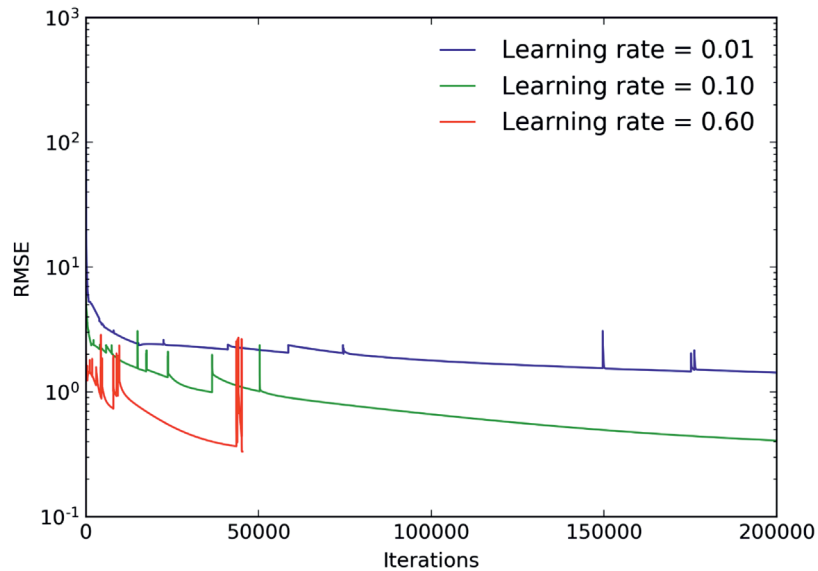


Fig. 5. Loss functions depending on various learning rates

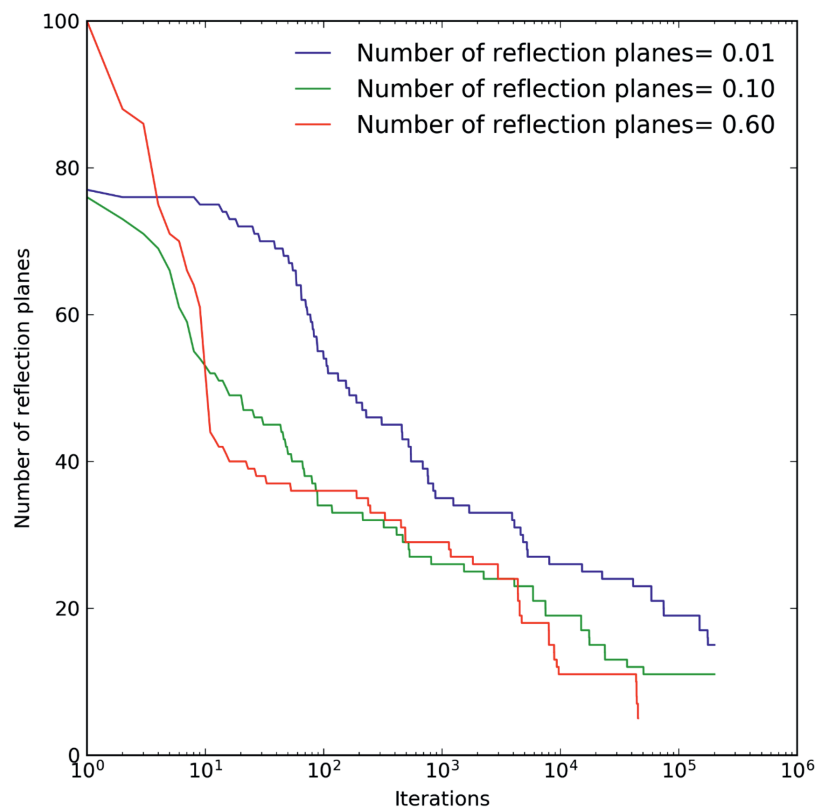


Fig. 6. Number of reflecting planes depending on the number of iterations

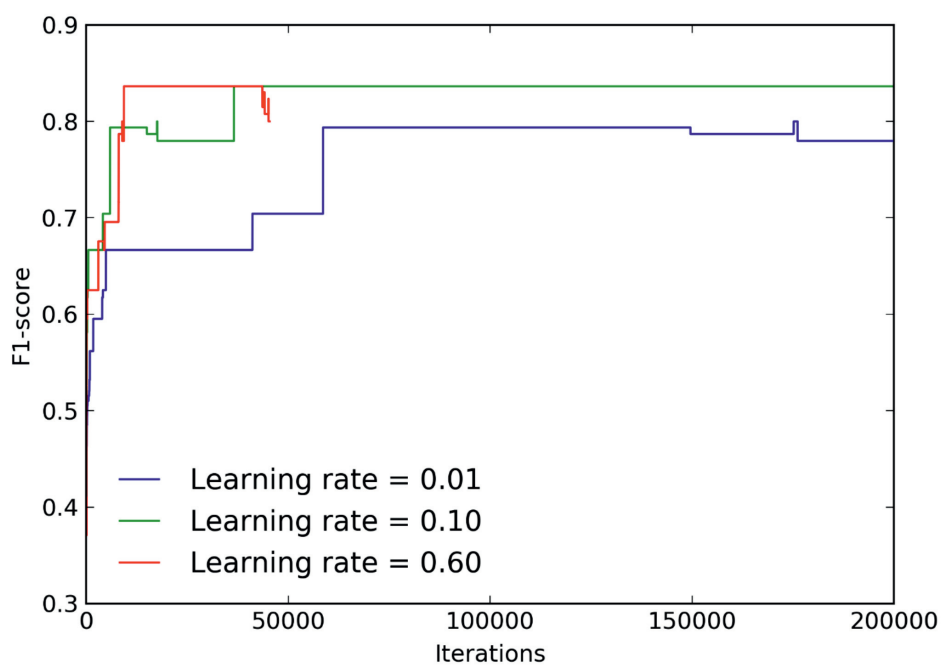


Fig. 7. Dependence of the F1-score metrics on various rates of the $\mathcal{A}_0$ algorithm's learning



The fastest convergence was achieved in the initialization by trace's extremes amplitudes. Fig. 5 shows the loss function's dependence on various values of the learning rate parameter.

The dependences in Fig. 5 show a standard pattern: increasing learning rate leads to faster convergence. Applied regularization by the number of reflecting planes (U_2) is shown in Fig. 5 as excursions in transition to fewer reflecting planes. This effect is shown in more detail in Fig. 6.

It can be seen from Fig. 6 that the number of reflecting planes stops changing at a certain number of iterations. Achievement of a minimum constant is one of the signs that the algorithm should be stopped, along with the decreasing RMSE.

Wiggle of reflecting planes' positions (E_2) is determined through the F1-score metrics. Fig. 7 shows dependence of the F1-score metrics on various learning rates of the algorithm.

Dependence of the F1-score metrics on various rates of the $\mathcal{A}0$ algorithm's learning rates. We have separately examined the dependences for errors E_1 (Fig. 5), E_2 (Fig. 6), E_3 (Fig. 7). Table 1 shows comparison of the E_{1-4} errors for the OMP algorithm and $\mathcal{A}0$.

It is significant that using the algorithm $\mathcal{A}0$ allows making significantly fewer errors for traces with five reflecting planes. Table 2 shows comparison of errors for the OMP and $\mathcal{A}0$ for the trace with 103 reflection planes (500 samples with 2 ms sampling rate).

As we can see from Table 2, the algorithm $\mathcal{A}0$ allows minimizing errors of decomposition below the OMP level. However, the algorithm $\mathcal{A}0$ maintains physical significance of decomposition coefficients.

Conclusion

We have developed an algorithm that allows incorporating physical laws into machine learning methods. To compare efficiency of the proposed algorithm the authors have developed a complex precision metrics containing four components:

- E_1 is the degree of two traces' mistie computed as a normalized sum of squared residuals, $\text{RMSE}\left(T, \check{T}\right)$.
- Difference in numbers of initial and resulting reflecting planes as a result of the algorithm's application (E_2).
- Wiggle of reflecting planes' positions (E_3)

Table 1

Comparison of the E_{1-4} errors for the OMP algorithm and $\mathcal{A}0$ for the trace with five reflecting planes

Algorithm / Error	OMP, 5 coefficients	OMP, 25 coefficients	OMP, 50 coefficients	$\mathcal{A}0$
E_1	145.07	10.67	1.61	0.59
E_2	0	20	45	0
E_3	0.2	0.06	0.04	0.38
E_4	829.43	788.61	752.37	10.03

Table 2

Comparison of the E_{1-4} errors for the OMP algorithm and $\mathcal{A}0$ for the trace with 103 reflecting planes

Algorithm / Error	OMP, 50 coefficients	OMP, 103 coefficients	OMP, 150 coefficients	$\mathcal{A}0$
E_1	39.84	9.40	0.92	0.87
E_2	53	0	47	2
E_3	0.23	0.25	0.24	0.33
E_4	1644.11	1562.16	1517.16	100.23

is determined through the F1-score metrics.

- Differences in reflection coefficients amplitudes (E_4).

The performed experiments have shown that the trained algorithm allows making lower value errors than the OMP [2] and maintaining

physical significance of resulting decomposition coefficients.

It is worthwhile to continue further studies in this direction on real data instead of synthetic ones, for a particular deposit with sufficient number of investigated wells.

REFERENCES

1. Mallat S.G., Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, Vol. 41, No. 12, Pp. 3397–3415.
2. Rubinstein R., Zibulevsky M., Elad M. *Efficient Implementation of the K-SVD Algorithm Using Batch Orthogonal Matching Pursuit Technical Report*. CS Technion, April 2008.
3. Saadat S.A., Safari A., Needell D. Sparse reconstruction of regional gravity signal based on Stabilized Orthogonal Matching Pursuit (SOMP). *Pure and Applied Geophysics*, 2016, Vol. 173, No. 6, Pp. 2087–2099.
4. Bo L., Ren X., Fox D. Unsupervised feature learning for RGB-D based object recognition. *Experimental Robotics*. Springer, Heidelberg, 2013, Pp. 387–402.
5. Butorin A.V., et al. Spectral inversion methods and its application for wave field analysis. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers, 2017. (rus)
6. Butorin A.V., Krasnov F.V., et al. Spectral inversion methods and its application for wave field analysis. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers, 2017. (rus)
7. Sanyi Yuan, Shangxu Wang, Ming Ma, Yongzhen Ji, Li Deng. Sparse bayesian learning-based time-variant deconvolution. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55(11), Pp. 6182–6194.
8. Mirzadjanadze A.H., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. *Modelling of oil and gas extraction*. Institute Computer Science, 2005.
9. Krasnov F., Glavnov N., Sitnikov A. A machine learning approach to enhanced oil recovery prediction. *In International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts*, Springer, 2017, Pp. 164–171.
10. Magnus Erik Hvass Pedersen. *Tuning & simplifying heuristical optimization*. PhD thesis, University of Southampton, 2010.

Received 11.11.2017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mallat S.G., Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries // *IEEE Transactions on signal processing*. 1993. Vol. 41. No. 12. Pp. 3397–3415.
2. Rubinstein R., Zibulevsky M., Elad M. Efficient Implementation of the K-SVD Algorithm Using Batch Orthogonal Matching Pursuit Technical Report. CS Technion, Apr. 2008.
3. Saadat S.A., Safari A., Needell D. Sparse reconstruction of regional gravity signal based on Stabilized Orthogonal Matching Pursuit // *Pure and Applied Geophysics*. 2016. Vol. 173. No. 6. Pp. 2087–2099.
4. Bo L., Ren X., Fox D. Unsupervised feature learning for RGB-D based object recognition // *Experimental Robotics*. Springer, Heidelberg, 2013. Pp. 387–402.
5. Butorin A.V., et al. Spectral Inversion Methods and its Application for Wave Field Analysis // *SPE Russian Petroleum Technology Conf*. Society of Petroleum Engineers, 2017.
6. Butorin A.V., Krasnov F.V., et al. Spectral inversion methods and its application for wave field analysis // *SPE Russian Petroleum Technology Conf*. Society of Petroleum Engineers, 2017.
7. Sanyi Yuan, Shangxu Wang, Ming Ma, Yongzhen Ji, Li Deng. Sparse bayesian learning-based time-variant deconvolution // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017. Vol. 55(11). Pp. 6182–6194.
8. Mirzadjanadze A.H., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. *Modelling of oil and gas extraction*. Institute Computer Science, 2005.
9. Krasnov F., Glavnov N., Sitnikov A. A machine learning approach to enhanced oil recovery prediction // *Internat. Conf. on Analysis of Images, Social Networks and Texts*. Springer, 2017. Pp. 164–171.
10. Magnus Erik Hvass Pedersen. *Tuning & simplifying heuristical optimization*. PhD thesis. University of Southampton, 2010.

Статья поступила в редакцию 11.11.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

KRASNOV Fedor V.

КРАСНОВ Федор Владимирович

E-mail: krasnov.fv@gazprom-neft.ru

BUTORIN Alexander V.

БУТОРИН Александр Васильевич

E-mail: Butorin.av@gazpromneft-ntc.ru

MIKHEYENKOV Andrey V.

МИХЕЕНКОВ Андрей Витальевич

E-mail: mikheen@bk.ru

МЕТОД ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТМЕТОК ЦЕЛЕЙ ОТ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ СТАНЦИЙ С ПОМОЩЬЮ Z-ТЕСТА ФИШЕРА

А.В. Кваснов

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

Рассмотрен метод отождествления отметок целей, полученных совмещенными пассивной и активной радиолокационными станциями. Метод основан на использовании Z-теста Фишера, позволяющего статистически проверять гипотезы о принадлежности (или раздельном наблюдении) обнаруженных объектов. В основе метода – статистические распределения пеленгов, полученных пассивной и активной станциями. Опираясь на предположения об отклонении распределения пеленгов активной станции от распределения генеральной совокупности пассивной станции, строится математическая модель Z-теста. Показаны условия, при которых обеспечивается выполнение метода, а также ограничения, не позволяющие использовать Z-тест. Рассмотрен алгоритм последовательного применения метода, и проведено имитационное моделирование в среде MatLab 2012, показавшее его эффективность в совмещенных радиолокационных комплексах

Ключевые слова: отождествление отметок цели; радиолокационная информация; Z-тест Фишера; формуляр цели; радиолокационный комплекс.

Ссылка при цитировании: Кваснов А.В. Метод отождествления радиолокационных отметок целей от активных и пассивных станций с помощью Z-теста Фишера // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 1. С. 28–37. DOI: 10.18721/JCSTCS.111103

THE METHOD OF IDENTIFYING RADAR TARGET MARKS FROM ACTIVE AND PASSIVE STATIONS BY MEANS OF Z-TEST

A.V. Kvasnov

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

The article describes a method of identification of target marks received by combined passive and active radar stations. The method is based on Fisher's Z-test, which allows to statistically test the hypothesis of belonging (or separate observation) of detected objects. The basis of this method are the statistical distributions of bearings obtained with passive and active stations. A mathematical model of the Z-test is built on the basis of assumptions about the deviation of the distribution of the active station's bearing from the distribution of the total population of the passive station. We have established the conditions providing the execution of the method, as well as the restrictions that do not allow to use the Z-test. We have considered an algorithm of consecutive application of the method and have conducted a simulation with MatLab 2012, which proved the method's effectiveness in combined radar complexes.

Keywords: identification marks of the target; radar information; Fisher's Z-test; form of the target; radar complex.



Citation: Kvasnov A.V. The method of identifying radar target marks from active and passive stations by means of Z-test. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 1, Pp. 28–37. DOI: 10.18721/JCSTCS.11103

Введение

В современных радиолокационных комплексах (РЛК) одной из важных проблем остается методика отождествления (сличения) целей в совмещенных средствах освещения воздушной и надводной обстановки¹. Такими совмещенными средствами, как правило, являются пассивные и активные РЛС, обеспечивающие устойчивое обнаружение отметок целей и обработку сигнала на уровне комплексирования радиолокационной информации [1]. Данная проблема актуальна как для авиационных комплексов, где могут быть интегрированы несколько станций различного типа и класса, так и для надводных средств, имеющих в своем составе до десятка таких станций [2] (рис. 1).

Существуют принципиальные различия в обработке радиолокационной информации активной и пассивной РЛС. Активные станции излучают свой собственный зондирующий сигнал и принимают его отраженный сигнал от цели, в то время как работа пассивных станций основана на

приёме сигнала от источника радиоизлучения, в качестве которого могут выступать радиотехнические средства противника [3]. Сектор обнаружения пассивных и активных средств радиолокации может существенно отличаться. Это объясняется, в первую очередь, условиями распространения радиоволн. В активных РЛС мощность принимаемого сигнала обратно пропорциональна четвертой степени дальности до объекта

– $P_{\text{АКТ}} \sim \frac{1}{D^4}$, в пассивных – квадрату расстояния – $P_{\text{ПАС}} \sim \frac{1}{D^2}$ [4]. Можно утверждать, что в большинстве случаев пассивные РЛС имеют преимущество перед активными РЛС за счет более раннего времени обнаружения объектов – целей.

Пассивные станции принимают информацию, полученную от объекта, в виде формуляра цели, в котором содержатся сведения о характеристиках сигнала (несущая частота, длительность импульсов, период их следования и пр.), а также угловые координаты цели. Эти данные можно пред-

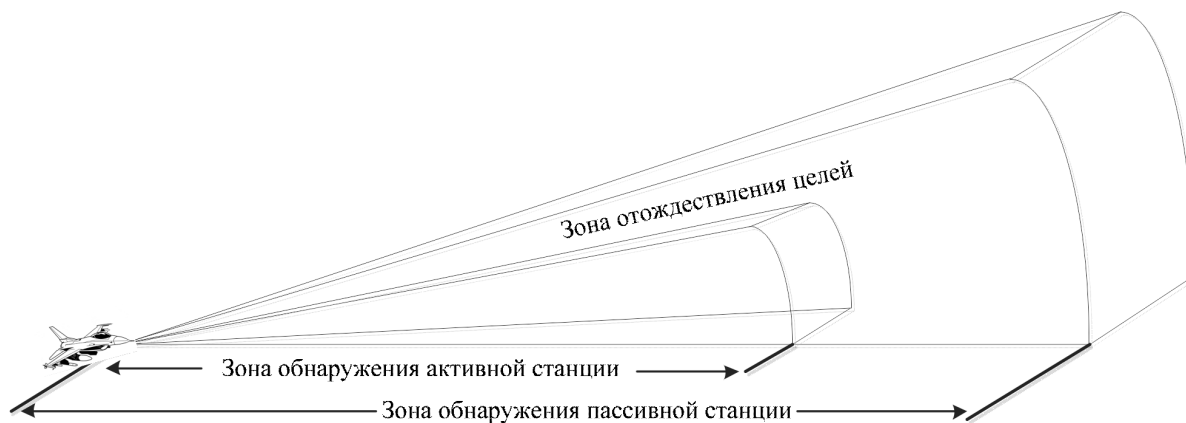


Рис. 1. Зоны обнаружения совмещенных РЛС

Fig. 1. Combined radar detection zones

¹ Дудник П.И., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г. Многофункциональные радиолокационные системы: Учеб. пособие для вузов. М.: Дрофа, 2007. 283 с.

ставить в виде вектора:

$$I_{\text{Пас.РЛС}} = [f_{\text{нес}} \quad \tau \quad T \quad \varepsilon_{\text{ПС}} \quad \beta_{\text{ПС}}]^T, \quad (1)$$

где $f_{\text{нес}}$ — несущая частота принимаемого сигнала; τ — длительность импульсов излучаемого объекта; T — период следования импульсов излучаемого объекта; $\varepsilon_{\text{ПС}}$ — азимутальный угол пассивной РЛС, на котором обнаружен объект; $\beta_{\text{ПС}}$ — угол места РЛС, на котором обнаружен объект.

Полученных данных, как правило, недостаточно для определения координат цели, поскольку в наличии имеются только пеленги объекта. По этой причине необходимо иметь дополнительные информационные данные, которые могут быть получены с помощью активной РЛС. Та, в свою очередь, способна обнаруживать объект и путем обработки информации формировать формуляр цели, содержащий угловые координаты объекта, расстояние до него и его радиальную скорость:

$$I_{\text{Акт.РЛС}} = [D \quad V_{\text{рад}} \quad \varepsilon_{\text{АС}} \quad \beta_{\text{АС}}]^T, \quad (2)$$

где D — дальность до обнаруженной цели; $V_{\text{рад}}$ — радиальная скорость наблюдаемого объекта; $\varepsilon_{\text{АС}}$ — азимутальный угол активной РЛС, на котором обнаружена цель; $\beta_{\text{АС}}$ — угол места РЛС, на котором обнаружена цель.

Чтобы существовала возможность совместного использования информации о наблюдаемом объекте, следует осуществить комплексирование формуляров цели от пассивной и активной РЛС. Иначе говоря, требуется отождествить наблюдаемые объекты. Это позволит иметь единый формуляр цели, содержащий сведения из выражений (1) и (2).

Постановка задачи

Комплексирование радиолокационной информации происходит на этапе третичной обработки, где осуществляется отождествление цели пассивной и активной РЛС $I_{\text{ОТОЖД}} = I_{\text{Акт.РЛС}} * I_{\text{ПРЛС}}$ [5]. Таким образом, совместное использование каналов пассивной и активной РЛС в составе РЛК увеличивает его эффективность и позволяет более точно определять координаты

цели и более детально классифицировать цель.

Можно утверждать, что к моменту отождествления отметок цели объем информационных данных, полученных от пассивной станции, существенно превышает объем информационных данных от активной станции. Первоначально пассивная станция за определенный период времени t накапливает n дискретных измерений отметки цели по каждому оцениваемому параметру из выражения (1). Полученные данные вектора (1) можно представить в виде матрицы:

$$I_{\text{ПС}} = \begin{bmatrix} f_{\text{нес}}(t_1) & f_{\text{нес}}(t_2) & \dots & f_{\text{нес}}(t_n) \\ \tau(t_1) & \tau(t_2) & \dots & \tau(t_n) \\ T(t_1) & T(t_2) & \dots & T(t_n) \\ \varepsilon_{\text{ПС}}(t_1) & \varepsilon_{\text{ПС}}(t_2) & \dots & \varepsilon_{\text{ПС}}(t_n) \\ \beta_{\text{ПС}}(t_1) & \beta_{\text{ПС}}(t_2) & \dots & \beta_{\text{ПС}}(t_n) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $f_{\text{нес}}(t_n)$ — несущая частота принимаемого сигнала излучающего объекта на n -отсчете; $\tau(t_n)$ — длительность импульсов излучающего объекта на n -отсчете; $T(t_n)$ — период следования импульсов излучающего объекта на n -отсчете; $\varepsilon_{\text{ПС}}(t_n)$ — азимутальный угол, на котором обнаружен излучающий объект на n -отсчете; $\beta_{\text{ПС}}(t_n)$ — угол места, на котором обнаружен излучающего объекта на n -отсчете.

Активная станция, в свою очередь, принимает m дискретных измерений отметки цели, которые также можно представить в виде матрицы:

$$I_{\text{АС}} = \begin{bmatrix} D(t_1) & D(t_2) & \dots & D(t_m) \\ V_{\text{рад}}(t_1) & V_{\text{рад}}(t_2) & \dots & V_{\text{рад}}(t_m) \\ \varepsilon_{\text{АС}}(t_1) & \varepsilon_{\text{АС}}(t_2) & \dots & \varepsilon_{\text{АС}}(t_m) \\ \beta_{\text{АС}}(t_1) & \beta_{\text{АС}}(t_2) & \dots & \beta_{\text{АС}}(t_m) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $D(t_m)$ — дальность до обнаруженной цели на n -отсчете; $V_{\text{рад}}(t_m)$ — радиальная скорость наблюдаемого объекта на n -отсчете; $\varepsilon_{\text{АС}}(t_m)$ — азимутальный угол, на котором обнаружена цель на n -отсчете; $\beta_{\text{АС}}(t_m)$ — угол места, на котором обнаружена цель на n -отсчете.

Как правило, $m \ll n$ по причине более раннего обнаружения цели средствами

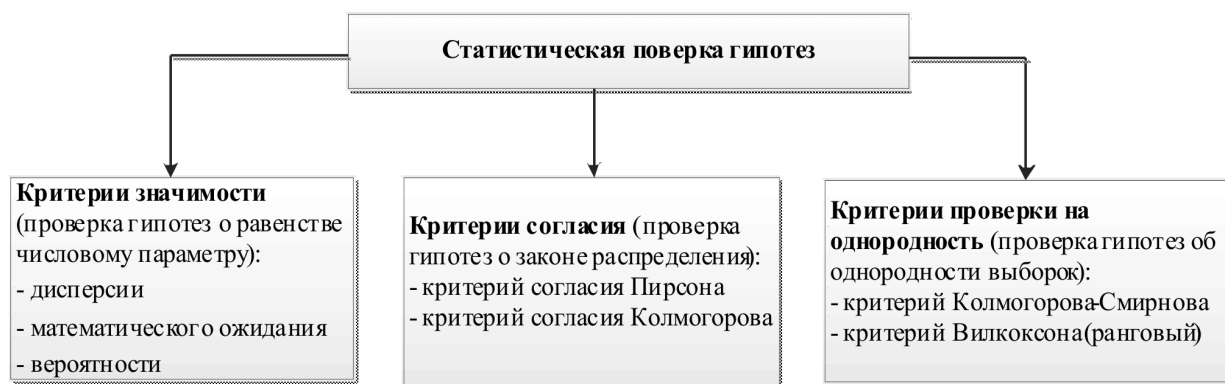


Рис. 2. Применение статистической проверки гипотез

Fig. 2. Testing of statistical hypotheses

пассивной локации. К моменту обнаружения цели активными средствами локации пассивные средства могут накопить до нескольких десятков отметок.

По полученным данным (3) и (4) следует отождествить объекты, т. е. принять одну из двух альтернативных гипотез:

обнаруженные отметки цели от пассивной и активной станции принадлежат одному объекту;

каждая из станций наблюдает различные объекты с разными радиолокационными свойствами.

Таким образом, *цель статьи* – разработка метода отождествления наблюдаемых объектов активной и пассивной радиолокационными станциями. На основе имеющихся данных об объекте (формуляров цели от пассивной и активной РЛС) необходимо выработать алгоритм, позволяющий принять решение об обнаружении единой отметки цели, либо наличие двух отдельных наблюдаемых объектов.

Обоснование математического аппарата

Результаты предыдущих исследований показали, что наиболее целесообразным методом решения задачи отождествления является применение методов *статистической проверки гипотез* [6]. Как известно, методы статистической проверки гипотез классифицируются в зависимости от используемых данных и применяемых усло-

вий² (рис. 2).

Алгоритм статистической проверки гипотез обычно представляет собой следующую последовательность действий:

1. По выборочным данным (в данном случае – координаты отметок целей) формулируют основную H_0 и альтернативную H_1 гипотезы.

2. Задают уровень значимости α (0,05 или 0,01).

3. В зависимости от H_0 определяют статистический критерий K , имеющий известное распределение.

4. По выборке и формуле критерия K рассчитывают наблюдаемое значение критерия $K_{\text{эмп}}$.

5. В зависимости от вида H_1 определяют вид критической области W и критические точки по таблице для распределения критерия K .

6. По результатам проверки $K_{\text{эмп}} \in W$ делают вывод о принятии или отклонении гипотезы H_0 .

7. Формулируют общий вывод исходя из поставленной задачи.

Выбор критерия для отождествления целей

Если обратить внимание на выражения

² Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. 9 изд., стер. М.: Высш. школа, 2003. 479 с.

(1) и (2), общим параметром для обоих векторов будет значение угловых координат $\varepsilon(t)$ и $\beta(t)$. Отождествление принимаемых отметок необходимо осуществлять по этим параметрам. Причем более информативным будет азимутальная координата $\varepsilon(t)$. Это объясняется тем, что обнаруживаемые объекты над горизонтом, как правило, имеют малый угол места, и им часто пренебрегают при решении инженерных задач.

Для современных активных РЛС зона обнаружения может достигать 100–150 км, в то время как дальность действия пассивных РЛС существенно зависит от энергопотенциала ИРИ и может составлять 200–300 км [7]. На таком расстоянии погрешность определения азимутальной координаты объекта будет существенной. Можно сказать, что задачей отождествления на первом этапе является, в первую очередь, *уменьшение вероятности ложного отождествления* при возможном пропуске отождествления цели, обнаруженной совмещенными РЭК.

Таким образом, наиболее целесообразно для отождествления отметок целей использовать критерий согласия Фишера (или Z-тест), позволяющий применять его для проверки равенства средних значений при известной дисперсии генеральной совокупности или при оценке выборочного среднего стандартизованных значений [8].

Z-тест (Z-критерий Фишера) для отождествления целей

Алгоритм применения Z-теста для ото-

ждествления отметок целей, полученных от пассивного канала РЛС и активного канала РЛС, будет иметь следующую последовательность этапов:

1. В качестве нулевой гипотезы H_0 предлагают использовать принадлежность полученной выборки азимутального угла активной РЛС $\varepsilon_{\text{Ак.РЛС}} = \varepsilon(\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_N)$ генеральной совокупности распределения азимутального угла пассивной РЛС $F = F(\varepsilon_{\text{Пас.РЛС}})$:

$$\varepsilon_{\text{Ак.РЛС}} \in F(\varepsilon_{\text{Пас.РЛС}}).$$

2. Уровень значимости α выбирается исходя из тактических задач отождествления целей. При этом возможны следующие варианты:

- гипотеза H_0 верна, и ее принимают (правильное отождествление);
- гипотеза H_0 неверна, и ее отвергают, принимая гипотезу H_1 (отсутствие отождествления);
- гипотеза H_0 верна, но ее отвергают согласно правилу проверки (пропуск отождествления) – ошибка первого рода;
- гипотеза H_0 неверна, но ее принимают согласно правилу проверки (ложное отождествление) – ошибка второго рода.

Уровень значимости α – это вероятность ошибки первого рода, т. е. вероятность того, что будет принята гипотеза H_1 , если на самом деле для генеральной совокупности верна гипотеза H_0 .

Вероятность ошибки второго рода обозначают β – это вероятность того, что бу-

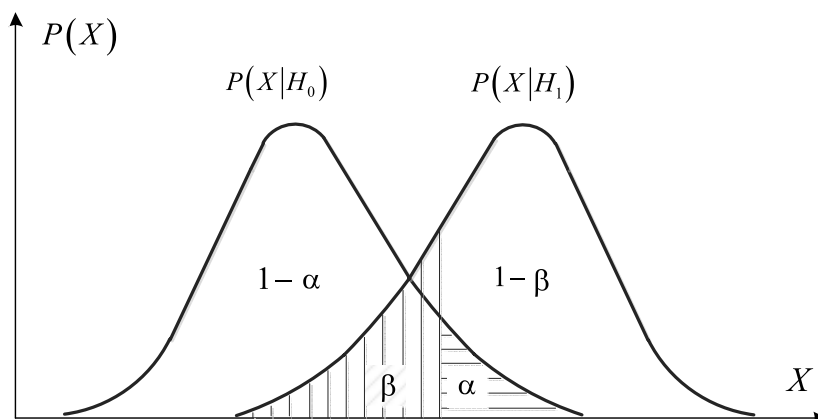


Рис. 3. Взаимосвязь ошибок первого и второго рода

Fig. 3. Interrelation of type I errors and type II errors

дет принята гипотеза H_0 , если на самом деле верна гипотеза H_1 .

Ошибки взаимосвязаны: с уменьшением ошибки α первого рода возрастает вероятность ошибки β второго рода и наоборот (рис. 3).

В условиях обнаружения объекта пассивными и активными станциями целесообразно уменьшать ошибку второго рода (ложное отождествление) при заданной вероятности ошибки первого рода.

3. Критерий согласия K при отождествлении отметок целей будет иметь следующую Z-статистику:

$$z = \frac{\varepsilon_{\text{Акт.РЛС}} - \bar{\varepsilon}_{\text{Пас.РЛС}}}{S_x}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{Акт.РЛС}}$ – случайная величина выборочного среднего значения (азимутальный угол активной РЛС), рассчитываемого по формуле $\varepsilon_{\text{Акт.РЛС}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$; $\bar{\varepsilon}_{\text{Пас.РЛС}}$ – зна-

чение математического ожидания генеральной совокупности (азимутальный угол пассивной РЛС); $S_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ – стандартная ошибка выборочного среднего, рассчитанного по выборке размера n из генеральной совокупности со среднеквадратическим отклонением σ .

4. В выражение (5) подставляют конкретные значения пеленгов для оценки эмпирических значений $K_{\text{эмп}}$.

5. Значения критерия позволяют судить о расхождении выборки с нулевой гипотезой. Из области допустимых значений критерия K следует выделить подобласть W таких значений, которые свидетельствовали бы о существенном расхождении данных с гипотезой H_0 . Подобласть W является критической областью. В нашем случае критическая область выбирается так, чтобы вероятность попадания в нее была минимальной (равной β) при заданном уровне α .

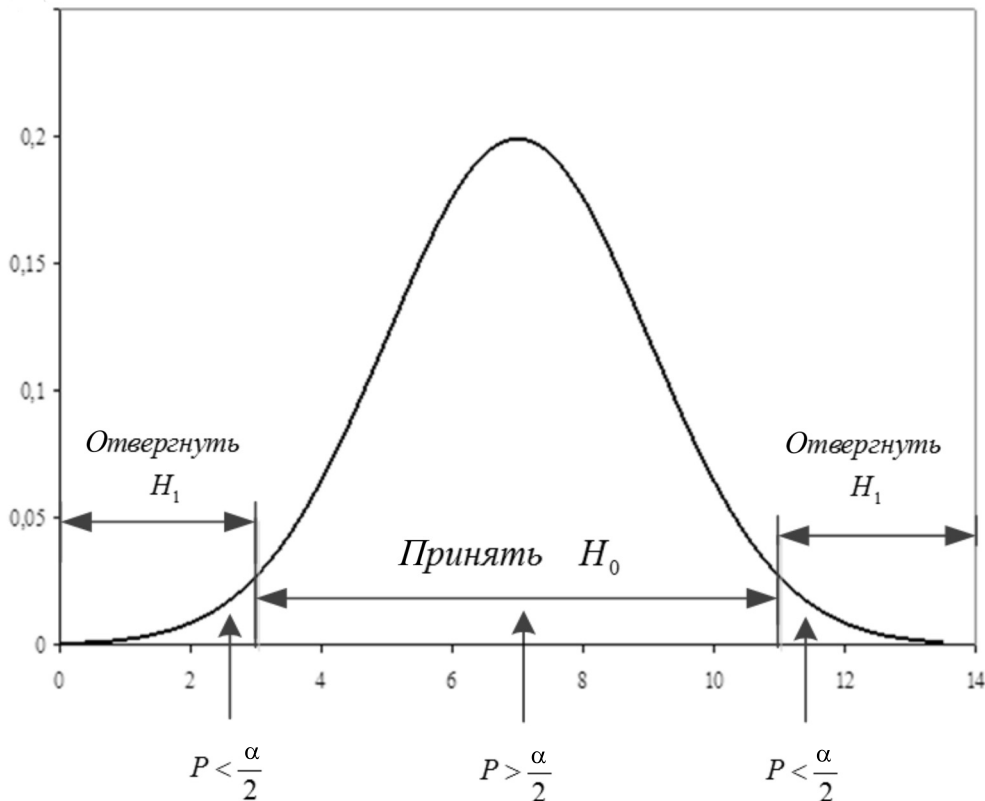


Рис. 4. Критерии принятия решений

Fig. 4. Criteria of make decision

Поскольку отождествление пеленгов от пассивной и активной станции происходит симметрично относительно линии визирования, границы критической области при заданном уровне значимости α будут двухсторонними: $P(K < K_{кр}) = \alpha / 2$ и $P(K > K_{кр}) = \alpha / 2$ (рис. 4).

б) если $K_{эмп}$ попадает в критическую область W , то гипотеза H_0 об отождествлении отметок целей отвергается, и принимается гипотеза H_1 (раздельное наблюдение отметок целей). Если $K_{эмп}$ не попадает в критическую область, гипотеза H_0 не отвергается (отождествление отметок целей).

Формально, Z-тест проверяет нулевую гипотезу $H_0: \varepsilon_{Пас.РЛС} = \varepsilon_{Акт.РЛС}$ против альтернативной гипотезы $H_1: \varepsilon_{Пас.РЛС} \neq \varepsilon_{Акт.РЛС}$ с уровнем значимости α , где известно среднее квадратическое отклонение генеральной совокупности σ .

Условия использования Z-теста и его ограничения

В совмещенных РЛК задача отождествления часто сводится к минимизации ошибки второго рода: $\beta \rightarrow \min$ (обычно ее необходимо принять менее 0,05) при заданном уровне ошибки первого рода $\alpha = \alpha_{const}$.

Иными словами, вероятность ложного отождествления должна быть существенно ниже, чем возможность пропуска отождествления. Это объясняется тем, что в дальней зоне наблюдения оценка координат объекта приводит к существенным погрешностям. По этой причине как пассивные РЛС, так и активные РЛС могут обнаружить либо одиночную, либо групповую цель. Целесообразность отождествления в таком случае не столь существенна (рис. 5).

Необходимыми условиями использования Z-теста в задачах отождествления являются:

1) количество измеренных дискретных отсчетов пассивной РЛС (генеральная совокупность) должно значительно превышать величину дискретных отсчетов активной станции (выборка);

2) генеральная совокупность измерений пассивной станции должна иметь нормальное распределение $N(\mu_0, \sigma)$;

3) процесс отождествления должен периодически повторяться (обычно период повторения составляет 2–20 с, что позволяет обновлять информацию об единой целевой обстановке и отслеживать возможные изменения в циклах работы наблюдаемого

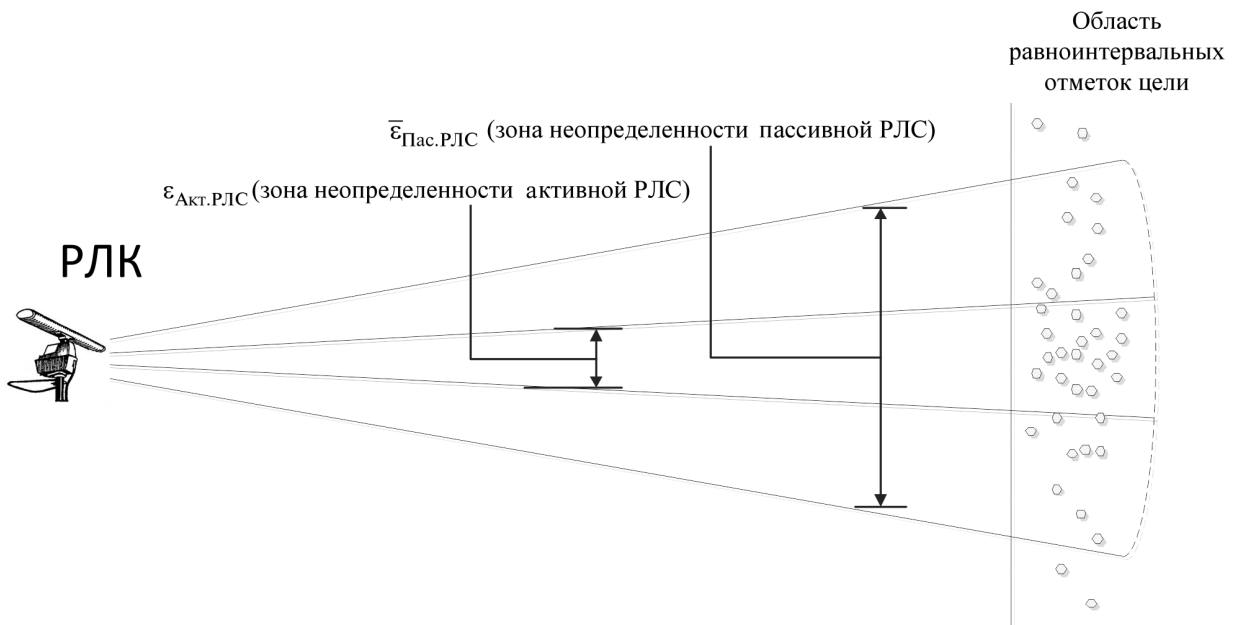


Рис. 5. Область обнаружения пассивной и активной РЛС

Fig. 5. Detection zone of passive and active radar



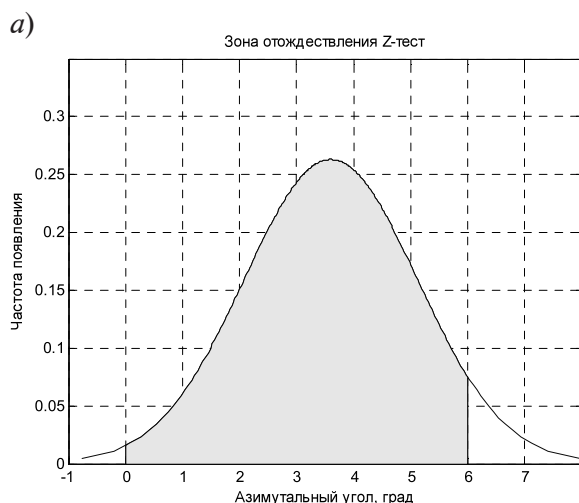
объекта, для которого характерны изменение режимов работы многофункциональных РЛС и возможные траекторные маневры).

Имитационное моделирование Z-теста

Имитационное моделирование процесса отождествления отметок целей проводилось в среде MatLAB 7.11 (рис. 6). В качестве исходных данных рассматривался сценарий обнаружения цели активным и пассивным

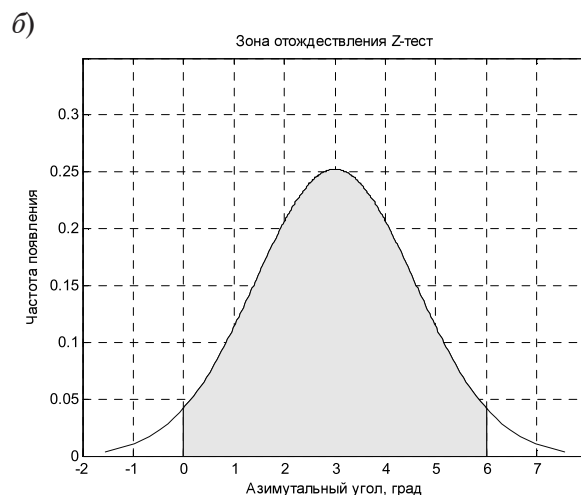
РЛС в зоне, ограниченной угловыми координатами $[0^\circ; 3^\circ]$ – для азимутального угла наблюдаемого объекта.

Предполагалось, что пассивная РЛС обнаруживает объект раньше активной РЛС, которая успевает обработать $T = 50$ отметок целей. По этой причине оценка угловых координат пассивной станцией имеет нормальное распределение $\varepsilon_{\text{Пас.РЛС}} \in N(\bar{\varepsilon}_{\text{Пас.РЛС}}, \sigma)$. Активная станция обнаруживает отметки



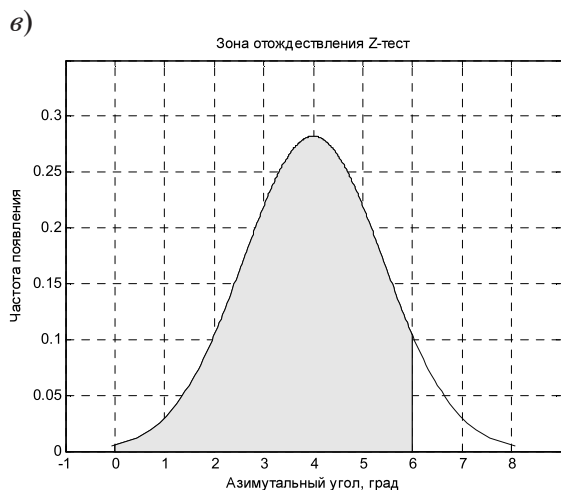
$$H_0 : \bar{\varepsilon}_{\text{Пас.РЛС}} = \varepsilon_{\text{Актив.РЛС}}$$

$$P(K_{\text{пр}} = K_{\text{ЭМП}} < K_{\text{лев}}) < 0,93$$



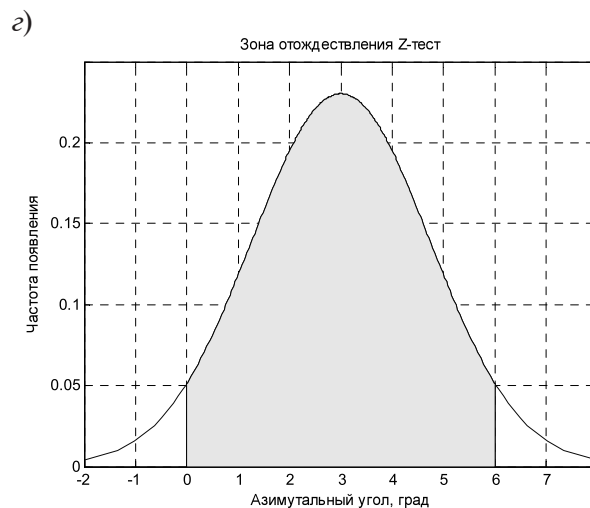
$$H_0 : \bar{\varepsilon}_{\text{Пас.РЛС}} = \varepsilon_{\text{Актив.РЛС}}$$

$$P(K_{\text{пр}} = K_{\text{ЭМП}} < K_{\text{лев}}) < 0,91$$



$$H_0 : \bar{\varepsilon}_{\text{Пас.РЛС}} = \varepsilon_{\text{Актив.РЛС}}$$

$$P(K_{\text{пр}} = K_{\text{ЭМП}} < K_{\text{лев}}) < 0,91$$



$$H_0 : \bar{\varepsilon}_{\text{Пас.РЛС}} = \varepsilon_{\text{Актив.РЛС}}$$

$$P(K_{\text{пр}} = K_{\text{ЭМП}} < K_{\text{лев}}) < 0,91$$

Рис. 6. Область отождествления: а – опыт 1; б – опыт 2; в – опыт 3; г – опыт 4

Fig. 6. Area of identification: а – experiment 1; б – experiment 2; в – experiment 3; г – experiment 4

цели согласно равномерному закону распределения $\varepsilon_{\text{Акт.РЛС}} \in \text{Rav}(\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max})$.

По результатам моделирования можно утверждать, что критическая область во всех четырех проведенных опытах не превышает $\alpha = 1 - \frac{K_{\text{ЭМП}}}{2} \approx 0,04$. Этот результат является достаточным для достижения отождествления отметок цели. Однако с точки зрения необходимого условия $\alpha \leq 0,05$ не удовлетворяет условию отождествления. Целесообразно использовать метод Z-теста с рядом ограничений, касающихся условий принятия решений по отождествлению с более высокой ошибкой первого рода, чем $\alpha = 0,05$.

Выводы

С учетом выявленных ограничений и недостатков метод отождествления отметок цели, полученных от пассивной и активной РЛС на основе Z-теста Фишера, можно использовать в многофункциональных радиолокационных комплексах. Разработанный

алгоритм позволяет применять метод для программных средств обработки информации в системах управления РЛС.

В результате исследования определен ряд ограничений предлагаемого метода и выработаны рекомендации по снижению их влияния при применении:

отождествление должно происходить в зоне обнаружения, где вероятность принятия ложного решения незначительна ($\beta \leq 0,05$) при заданной вероятности пропуска отождествления ($\alpha = \text{const}$);

количество отметок цели, полученных активной РЛС, должно быть значительно меньше полученных отметок цели пассивной РЛС. В таком случае пассивная РЛС может оценивать выборку отметок цели как генеральную совокупность.

Проведено имитационное моделирование, в результате которого было установлено, что метод позволяет отождествлять отметки цели с вероятностью ошибки первого рода (пропуск цели) $\alpha \approx 0,04$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.
2. Jane's Fighting Ships 2009-2010 // URL: <http://www.jfs.janes.com> (Дата обращения: 20.10.2017).
3. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
4. Основы радиолокации // Справочник по радиолокации. Т. 1. Под ред. М. Скольника. М.: Сов. радио, 1976. 456 с.
5. Кваснов А.В. Оценка построения трассы радиолокационной цели неподвижным лучом АФАР в дальней зоне наблюдения // Радиотехника. 2017. № 2. С. 4–12.

Статья поступила в редакцию 09.11.2017.

6. Кваснов А.В. Метод отождествления радиоизлучающих целей пространственно-разнесенными пассивными радиоэлектронными станциями на основе t-критерия Стьюдента // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. Вып. 6. С. 23–28.
7. Кваснов А.В., Поляков В.Б. Анализ алгоритмов сканирования воздушного пространства АФАР для сокращения времени поиска надводных и аэродинамических целей // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 24–35.
8. Справочник по прикладной статистике в 2-х т. Т. 1. Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю.Н. Тюрина. М.: Финансы и статистика, 1989. 510 с.

REFERENCES

1. Kuzmin S.Z. *Osnovy proyektirovaniya sistem tsifrovoy obrabotki radiolokatsionnoy informatsii* [Fundamentals of system design for digital radar process information]. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1986, 352 p. (rus)
2. Jane's Fighting Ships 2009–2010. Available: <http://www.jfs.janes.com> (Accessed: 20.10.2017).
3. Kondratyev V.S., Kotov A.F., Markov L.N.

6. Kvasnov A.V. *Mnogopozitsionnyye radiotekhnicheskiye sistemy* [Multiposition radio engineering systems]. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1986, 264 p. (rus)
7. Skolnik M.I. (ed.) *Osnovy radiolokatsii. Spravochnik po radiolokatsii* [Radar handbook]. Moscow: Sovetskoye radio Publ., 1976, Vol. 1, 456 p. (rus)
5. Kvasnov A.V. *Otsenka postroyeniya trassy*



radiolokatsionnoy tseli nepodvizhnym luchom AFAR v dalney zone nablyudeniya [Estimation of tracking target using a fixed beam active phased array radar in far-field region]. *Radiotekhnika [Radiotechnic]*, 2017, No. 2, Pp. 4–12. (rus)

6. **Kvasnov A.V.** Metod otozhdestvleniya radioizluchayushchikh tseley prostranstvenno-raznesennymi passivnymi radioelektronnyimi stantsiyami na osnove t-kriteriya Styudenta [Method of Radio-Emitting Target Identification from Passive Spatial Diversity Radio-Electronic Stations on the Basis of Student's t-Test]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika*,

Received 09.11.2017.

St. Petersburg: SPbGETU «LETI» Publ., 2016, Vol. 6, Pp. 23–28. (rus)

7. **Kvasnov A.V., Polyakov V.B.** Analiz algoritmov skanirovaniya vozdushnogo prostranstva AFAR dlya sokrashcheniya vremeni poiska nadvodnykh i aerodinamicheskikh tseley [Analysis of air scanning algorithms to reduce the search time for surface and aerodynamic targets]. *Radiopromyshlennost [Radio industry]*, 2016, No. 2, Pp. 24–35. (rus)

8. **Lloyd E., Lederman U., Tyurin Yu.N.** (eds.) *Spravochnik po prikladnoy statistike. Vol. 1 [Handbook of applicable mathematics, Vol. 1]* Moscow: Finansy i statistika Publ., 1989, 510 p. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

КВАСНОВ Антон Васильевич

KVASNOV Anton V.

E-mail: AntonKV@mail.ru



ICAIT 2018 AIZU

3rd International Conference on Applications in Information Technology

November 1 - 3, 2018, Aizu-Wakamatsu

<http://ica-it-aizu.org>

The 3rd International Conference on Applications in Information Technology in Aizu-Wakamatsu (Japan) is the meeting point for researchers, scholars and IT-industry professionals interested in advancing computer science and technology towards serving society and expectations of the day in the digitally transformed world. Our objective is to foster rich creativity in students' research works and to encourage young scientists to participate actively in open discussions with their colleagues.



CALL FOR PAPERS The 3rd International Conference on Applications in Information Technology invites original contributions presenting new advances and research results in a rich domain of information technology applications.

In 2018 we particularly welcome high quality contributions in the areas which include but are not limited to:

- Computer Systems and Architectures
- Software Design and Engineering
- Web Engineering
- Control Systems
- Intelligent and Embedded Systems
- Cloud Computing and Networking
- Human-Centric Computing
- Information Retrieval and Data Science
- Information Management
- Mobile and Cross Platform Applications
- Knowledge Engineering
- Machine Learning
- Information Technology for Learning and Education
- Machine Vision and Pattern Recognition
- Modeling and Simulation
- Game Development
- 3D Modeling, Virtualization and Visualization
- Internet of Things
- Programming Robots
- Information Technology in Economy

IMPORTANT DATES May 31, 2018

September 2, 2018

September 23, 2018

November 1 – 3, 2018

Paper submission

Acceptance notification

Camera-ready paper submission

Conference

Accepted papers will be published in the Conference ISBN labeled proceedings. Selected papers, after further revisions, will be recommended for publication in the conference partner journals.

VENUE

The University of Aizu

Tsuruga, Ikki-machi,
Aizu-Wakamatsu, 9658580,
Japan



О РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ

И.Г. Черноруцкий, В.П. Котляров

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

Разработана методика аппроксимации матриц вторых производных от целевого функционала на основе рекуррентного метода наименьших квадратов и модифицированного алгоритма Качмажа. Методика позволяет использовать высокоэффективные методы второго порядка, например, ньютоновского типа без дополнительных вычислительных затрат на построение конечноразностных аппроксимаций производных или иных прямых методов вычисления производных. Предложенные технологии ориентированы на решение как выпуклых, так и невыпуклых задач нелинейного программирования. Представленные подходы к построению процедуры рекуррентного оценивания вторых производных целевого функционала, определенного в конечномерном евклидовом пространстве, могут применяться при использовании методов нелинейного программирования второго порядка.

Ключевые слова: рекуррентный метод наименьших квадратов; алгоритм Качмажа; нелинейное программирование; невыпуклые задачи; методы оптимизации второго порядка.

Ссылка при цитировании: Черноруцкий И.Г., Котляров В.П. О реализации методов нелинейного программирования второго порядка на основе рекуррентных алгоритмов оценивания // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 1. С. 39–46. DOI: 10.18721/JCSTCS.111104

IMPLEMENTATION OF NONLINEAR PROGRAMMING SECOND ORDER METHODS ON THE BASIS OF RECURRENT ESTIMATION ALGORITHMS

I.G. Chernorutskiy, V.P. Kotlyarov

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

A method of goal function second derivatives approximation is developed. It is based on the recurrent least squares method and the modified Kaczmarz algorithm. The technique allows to use highly effective methods of second order, for example, Newton type without additional computational costs to build finite difference

approximations of derivatives or other direct methods of derivative calculation. The developed technology is focused on solving convex and non-convex nonlinear programming problems. The two approaches to constructing a recursive procedure for estimating second derivatives can be applied to second-order methods of nonlinear programming. Thus, the starting point of the Hessian is computed (approximated) directly, for example on the basis of finite difference approximations of derivatives. Next, while running the chosen second-order method, the matrix of second derivatives is consistently updated and refined based on the proposed technologies, allowing the significantly reduce the computational costs.

Keywords: recurrent least squares method; the modified algorithm of Kaczmarz; nonlinear programming; nonconvex problems; the second order optimization methods.

Citation: Chernorutskiy I.G., Kotlyarov V.P. Implementation of nonlinear programming second order methods on the basis of recurrent estimation algorithms. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 1, Pp. 39–46. DOI: 10.18721/JCSTCS.11104

Введение

Актуальность данной работы состоит в том, что одна из главных проблем при реализации наиболее эффективных методов нелинейного программирования (НП) второго порядка связана с необходимостью вычисления «кривизны пространства», задаваемой матрицей вторых производных (Гессе) минимизируемого функционала. Известные подходы, основанные на построении классических алгоритмов ньютоновского типа, аппроксимирующих методов Пауэлла, Флетчера–Пауэлла–Гольдфарба–Шенно и т. п., давно уже ставшие классическими, наталкиваются на существенные проблемы при решении прикладных невыпуклых задач [1–8]. Поэтому представляет интерес независимая от схемы метода технология вычисления аппроксимаций матриц Гессе с целью последующего применения как известных методов второго порядка, так и специальных методов второго порядка, сохраняющих эффективность в невыпуклом случае и основанных на явном использовании матриц вторых производных. В таких случаях обычно применяются алгоритмы на основе конечноразностных аппроксимаций производных, что может приводить к очень большим вычислительным затратам, оцениваемым в Горнерах (количествах вычислений целевого функционала). Предлагаемая технология основана на известных математических моделях рекуррентного оценивания [9–13] и не исключает использования любых схем оптимизации. Она мо-

жет применяться параллельно и независимо от работы базового метода. В известном смысле развиваемый подход позволяет без дополнительных вычислительных затрат получать дополнительную информацию о вторых производных в процессе работы любого метода с последующим решением вопроса о целесообразности перехода на более мощные методы второго порядка [14, 15].

Таким образом, главная и единственная цель настоящей статьи заключается в том, чтобы обратить внимание разработчиков программного обеспечения на возможность применения процедур рекуррентного оценивания в методах оптимизации второго порядка. Далее в работе проиллюстрирована методика применения таких методов на примере известного рекуррентного процесса метода наименьших квадратов и алгоритма Качмажа. Мы не претендуем на новизну в этой части работы, поэтому в статье не проводится обзор многочисленных результатов в области аппроксимации производных. Любой из них, в принципе, может использоваться для достижения рассматриваемых целей.

Второе замечание касается записи некоторых формул. Мы следуем принятому в линейной алгебре принципу сокращения обозначений. Например, запись cx для векторов c и x означает, что c — вектор-строка, а x — вектор-столбец с одинаковым числом компонентов, так что эту запись можно рассматривать как скалярное произведение c и

х (см., например, Скрейвер А. Теория линейного и целочисленного программирования: В 2-х т. Т. 1. 1991. С. 16). В некоторых формулах при отсутствии разночтений мы также опускаем очевидные знаки транспонирования и предполагаем согласованность всех векторов и матриц.

И последнее предварительное замечание. Везде в работе предполагается (как указано выше), что трудоемкость реализации алгоритма оптимизации определяется количеством обращений к процедуре вычисления целевого функционала и измеряется в Горнерах. Именно на это уходит основное время вычислений. Поэтому нет необходимости в дополнительных оценках количества арифметических операций и т. п. Предлагаемые в статье реализации известных методов оптимизации не требуют дополнительных вычислительных затрат в Горнерах, поэтому трудоемкость реализации самих рекуррентных алгоритмов здесь не учитывается и не оценивается.

Большинство методов НП являются генераторами минимизирующих последовательностей. В процессе оптимизации анализируются значения целевого функционала на точках последовательности, и тем или иным способом, в зависимости от используемого алгоритма, производится выбор точек с наилучшими значениями целевого функционала.

В результате получаются последовательность векторов $\{x^k\}$ и отвечающая им последовательность значений минимизируемого целевого функционала $\{J_k\}$. При этом существенно используются только те точки x^k , которые приводят к монотонному убыванию $J(x)$, а «неудачные», «вспомогательные» точки отбрасываются и далее никак не участвуют в процессе поиска.

Основная задача данной статьи заключается во встраивании в процесс оптимизации процедур аппроксимации матриц Гессе минимизируемых функционалов по полным последовательностям $\{x^k\}, \{J_k\}$, получаемым в результате работы некоторого «базового» метода НП без дополнительных вычислений значений целевого функционала.

Рассмотрим последовательности $\{x^k\}, \{J_k\}$, генерируемые некоторым методом НП. В данном случае имеются в виду «полные» последовательности, включающие как удачные, так и неудачные, а также «пробные» шаги. Опишем процедуру, позволяющую по этой информации вычислить матрицу Гессе аппроксимирующего квадратичного функционала.

Задачу квадратичной аппроксимации будем решать на основе метода наименьших квадратов (МНК):

$$F_N(c) \triangleq \sum_{i=1}^N [J(x^i) - f(x^i, c)]^2 \rightarrow \min_{c \in R^m},$$

$$x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i), c = (c_1, c_2, \dots, c_m), \quad (1)$$

$$m = \frac{n^2}{2} + \frac{3n}{2} + 1, N \geq m.$$

Здесь символ x_i^k означает i -ю составляющую k -го вектора, а $f(x, c)$ — аппроксимирующий функционал с неизвестными коэффициентами c_i :

$$\begin{aligned} f(x, c) = & c_1(x_1)^2 + c_2x_1x_2 + c_3x_1x_3 + \dots \\ & \dots + c_nx_1x_n + c_{n+1}(x_2)^2 + c_{n+2}x_2x_3 + \dots \\ & \dots + c_{2n-1}x_2x_n + \\ & \dots \\ & + c_{\frac{n^2+n}{2}}(x_n)^2 + c_{\frac{n^2+n}{2}+1}x_1 + \dots + c_{m-1}x_n + c_m. \end{aligned} \quad (2)$$

Полагая $y(x) \triangleq ((x_1)^2, x_1x_2, \dots, x_1x_n, (x_2)^2, \dots, (x_n)^2, x_1, \dots, x_n, 1)$, представим (2) в виде $f(x, c) = \langle c, y \rangle = y^T c$, что позволяет говорить о линейной регрессионной задаче оценки параметров $c_1, \dots, c_m$.

Система нормальных уравнений, отвечающая МНК-функционалу (1), имеет вид:

$$Y_N Y_N^T c \triangleq \sum_{k=1}^N y^k (y^k)^T c = Y_N J^N \triangleq \sum_{k=1}^N J_k y^k, \quad (3)$$

где $Y_N = (y^1, y^2, \dots, y^N)$ — матрица размерности $m \times N$; $y^k \triangleq y(x^k)$; $J^N \triangleq (J_1, J_2, \dots, J_N)^T$.

Можно рассчитать коэффициенты квадратичной модели непосредственно из системы линейных алгебраических уравнений (3). Однако с вычислительной точки зрения более рациональным может оказаться другой подход, позволяющий избежать решения линейных систем.

Известно [9], что для псевдообратной матрицы $(\cdot)^+$ выполняется соотношение:

$$(Y^T)^+ = \lim(\delta E + YY^T)^{-1}Y, \delta \rightarrow 0, \delta > 0.$$

Отсюда следует, что вместо системы уравнений

$$Y_r Y_r^T c = Y_r J^r \quad (4)$$

можно рассматривать систему

$$(\delta E + Y_r Y_r^T) c = Y_r J^r, \quad (5)$$

решение которой при $\delta \rightarrow 0$ сходится к решению (4) с минимальной нормой среди всех векторов, минимизирующих величину $\|Y_r^T c - J^r\|^2 \rightarrow \min$, что при $r = N$ совпадает с выражением (4).

Ниже на основе известных рекуррентных алгоритмов оценивания будут построены методы решения регуляризованных систем (5) при конечных малых значениях параметра δ . В данном случае δ играет роль параметра регуляризации, обеспечивая устойчивость получаемых решений к ошибкам округления. При $\delta = 0$ решение системы (4) может наталкиваться на существенные вычислительные трудности, так как при $N < m$ матрицы $Y_N Y_N^T$ будут вырождены, а при $N > m$ — плохо обусловлены. Введем обозначение:

$$P_r^{-1} \triangleq \sum_{k=1}^r y^k (y^k)^T + \delta E = P_{r-1}^{-1} + y^r (y^r)^T. \quad (6)$$

Используя так называемую вторую лемму об обращении матриц (эквивалентную формуле Шермана–Моррисона–Вудбери)

$[K^{-1} + B^T R^{-1} B]^{-1} = K - KB^T [BK B^T + R]^{-1} BK$, получим рекуррентное соотношение [9, 10]:

$$P_r = [P_{r-1}^{-1} + y^r (y^r)^T]^{-1} = P_{r-1} - P_{r-1} y^r [(y^r)^T P_{r-1} y^r + 1]^{-1} (y^r)^T P_{r-1}. \quad (7)$$

Так как, очевидно, $P_1^{-1} = y^1 (y^1)^T + \delta E$, то из (6) следует, что необходимо положить $P_0^{-1} = \delta E$ или $P_0 = \delta^{-1} E$.

Матрица P_0^{-1} симметрична и положительно определена. Предположим, что P_{r-1}^{-1} симметрична и положительно определена, и покажем, что P_r^{-1} обладает такими же свойствами. Последнее, согласно теории симметричных возмущений [12], немед-

ленно следует из представления (6), т. к. матрица $y^r (y^r)^T$ симметрична и неотрицательно определена. Поэтому по принципу индукции все матрицы P_r^{-1} , а вместе с ними и P_r будут симметричны и положительно определены. Таким образом, все обратные матрицы в (7) существуют.

Построим рекуррентное соотношение для определения оценок c_i^r . Уравнение (5) имеет вид:

$$P_r^{-1} c^r = \sum_{k=1}^r J_k y^k, \quad (8)$$

откуда

$$P_r^{-1} c^r = \sum_{k=1}^{r-1} J_k y^k + y^r J_r = P_{r-1}^{-1} c^{r-1} + y^r J_r. \quad (9)$$

Здесь c^r означает оценку вектора c по r вычислениям функционала $J(x)$. Прибавляя и вычитая $y^r (y^r)^T c^{r-1}$ в правой части (9), получим:

$$P_r^{-1} c^r = P_{r-1}^{-1} c^{r-1} + y^r [J_r - (y^r)^T c^{r-1}]. \quad (10)$$

Из (10) имеем окончательное выражение:

$$c^r = c^{r-1} + P_r y^r [J_r - (y^r)^T c^{r-1}]. \quad (11)$$

По формуле (11) может быть вычислена новая оценка c^r вектора параметров при условии, что известна предыдущая оценка c^{r-1} , матрица P_r и вновь полученные численные данные $J_r, y^r = y(x^r)$.

Последовательный метод оценки параметров квадратичной модели функционала J позволяет заменить процедуру обращения матрицы полной нормальной системы уравнений (5) операцией вычисления скаляра, обратного к заданному $(y^r)^T P_{r-1}^{-1} y^r + 1$, выполняемой на каждом шаге итерационного процесса (7).

Непосредственно из построения уравнения видно, что результат для $r = N$, полученный согласно (7), (11), приводит к оценке, которая получается из решения полной системы (5). При этом необходимо положить $c^0 = 0$. Последнее следует из соотношений (8), (11), записанных для $r = 1$.

Действительно, согласно (11), имеем оценку $c^1 = P_1 J_1 y^1$, полученную в результате решения системы (8). Из (11) следует $c^1 = c^0 + P_1 y^1 [J_1 - (y^1)^T c^0]$.

Поэтому для совпадения обеих оценок c^1 , а значит, и последующих оценок, необходимо и достаточно положить $c^0 = 0$.

На основе вычисленных оценок $c_i^N, i \in \left[1 : \frac{n^2 + 3n}{2} + 1\right]$, задающих аппроксимацию матрицы $J''(x)$, может быть реализован соответствующий метод НП второго порядка, например, один из ньютоновских методов. При этом возможны различные стратегии применения изложенного общего подхода, конкретизирующие способ выбора числа «измерений» y^r, J_r , участвующих в коррекции текущей оценки, а также самих точек y^r . Целесообразно после определенного числа шагов обновлять процесс и вновь начинать процедуру построения аппроксимации. Такая тактика позволяет не учитывать «устаревшие» значения J , расположенные далеко от текущей точки.

Изложенная процедура обладает определенными свойствами адаптации по локализации окрестности текущей точки, в которой строится аппроксимирующая квадратичная модель. Действительно, если норма результирующего вектора продвижения в текущих осях относительно велика, то исходный функционал заменяется квадратичным в достаточно широкой области пространства поиска. Если же продвижение мало, то автоматически на формирование квадратичной модели оказывают влияние только близкие точки. Тем самым область предполагаемой «квадратичности» целевого функционала сжимается.

Опыт применения такого типа алгоритмов для целей оптимизации в настоящее время недостаточен. Однако можно ожидать, что в ряде случаев будут возникать трудности, связанные с рациональным выбором δ , определяющим, в частности, погрешности промежуточных вычислений и их влияние на результат. В этом смысле подбор δ необходимо начинать с относительно больших значений, позволяющих с достаточной точностью получать «малые разности больших величин» при реализации соотношений (7). Кроме этого необходимо учитывать, что указанные реализации методов НП второго порядка приводят

к увеличению объема необходимой памяти компьютера.

Другой подход к применению рекуррентных методов оценивания параметров линейных моделей для целей оптимизации может быть основан на модифицированном алгоритме Качмажа [13].

Используя представление (2), записанное в виде

$$f = y^T c, \quad (12)$$

где c — вектор оцениваемых параметров, получим следующую рекуррентную процедуру уточнения оценок c_i параметров c_i^* .

$$c^k = d^k + \frac{f_k - \langle d^k, y^k \rangle}{\langle y^k, y^k \rangle} y^k, \quad (13)$$

$$\frac{(f_k - \langle y^k, d^{k-1} \rangle)^2}{\langle y^k, y^k \rangle} > \frac{(f_{k-1} - \langle y^{k-1}, d^{k-1} \rangle)^2}{\langle y^{k-1}, y^{k-1} \rangle} + \frac{(f_k - \langle y^k, c^{k-1} \rangle)^2}{\langle y^k, y^k \rangle}, \quad (14)$$

$$d^k = \begin{cases} d^{k-1}, & \text{если выполнено неравенство (14)} \\ c^{k-1} & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Геометрически алгоритм (13) реализует операцию проектирования вектора d^k на k -ю гиперплоскость (12), что приводит к монотонной (в евклидовой норме) сходимости последовательности оценок к точным значениям. В классическом варианте алгоритма Качмажа $d^k \equiv c^{k-1}$, что, однако, вызывает более медленную сходимость.

Основные достоинства алгоритма (13) заключаются в небольшом количестве вычислений для реализации соотношений (13), (14), а также в существенно меньших объемах необходимой памяти компьютера по сравнению с рекуррентным методом наименьших квадратов. Кроме того, алгоритм (13) сохраняет эффективность при наличии малых помех измерений и медленном дрейфе вектора параметров c^* , приводя к достаточно точным оценкам.

Например, реализация методов обобщенного покоординатного спуска второго порядка [14, 15] — ОПС с применением модифицированного алгоритма Качмажа

сводится к следующей последовательности шагов.

Алгоритм KACZM

Шаг 1. Ввести исходные данные: $x \in R^n$, $c \in R^N$ ($N = n^2/2 + 3n/2 + 1$), $s \in R^1$; положить $F := J(x)$, $d := c$; $y^0 := y(x)$, $F_0 := F$.

Шаг 2. Положить $h_i := s$, $i \in [1: n]$.

Шаг 3. Положить $U = E$, где E – единичная матрица; в качестве координатных векторов взять столбцы $\{u^i\}$ матрицы U .

Шаг 4. Положить $m := 1$.

Шаг 5. Положить $x := x + h_m u^m$; $y^1 := y(x)$; вычислить $F_1 = J(x)$. Если

$$\frac{(F_1 - \langle y^1, d \rangle)^2}{\langle y^1, y^1 \rangle} \leq \frac{(F_0 - \langle y^0, d \rangle)^2}{\langle y^0, y^0 \rangle} + \frac{(F_1 - \langle y^1, c \rangle)^2}{\langle y^1, y^1 \rangle},$$

положить $d_i = c$.

Шаг 6. Положить

$$c := d + \frac{(F_1 - \langle d, y^1 \rangle)^2}{\langle y^1, y^1 \rangle} y^1; F_0 := F_1; y^0 := y^1.$$

Шаг 7. Если $F_1 \leq F$, положить $h_m := 3h_m$, $F := F_1$ и перейти к шагу 9, иначе – перейти к шагу 8.

Шаг 8. Положить $x := x - h_m u^m$, $h_m := 0,5h_m$.

Шаг 9. Положить $m := m + 1$. Если $m \leq n$, перейти к шагу 5, иначе – к шагу 10.

Шаг 10. Проверить условия поворота осей. Если они выполнены, перейти к шагу 11; иначе – к шагу 4.

Шаг 11. На основе вычисленных оценок c_i , $i \in [1: (n^2 + n)/2]$ построить аппроксимацию G матрицы $J''(x)$.

Шаг 12. С помощью процедуры *jacobi* [12] построить ортогональную матрицу $U = \{u^i\}$, приводящую матрицу G к диагональному виду $U^T G U$; перейти к шагу 4.

Процесс заканчивается по исчерпанию заданного числа вычислений $J(x)$. Условия поворота осей определяются конкретными реализациями метода ОПС. При выполне-

нии шагов 5, 6 производится проверка на корректность соответствующих операций деления. Если деление невозможно, очередное измерение F_1 игнорируется.

Заключение

Представлены два подхода к построению процедуры рекуррентного оценивания вторых производных целевого функционала, определенного в конечномерном евклидовом пространстве. Каждая из этих процедур может применяться при использовании методов нелинейного программирования второго порядка. При этом в начальной точке матрица Гессе вычисляется (аппроксимируется) непосредственно, например, на основе конечноразностных аппроксимаций производных. Далее, по мере работы выбранного метода второго порядка матрица вторых производных последовательно обновляется и уточняется на основе предложенных алгоритмов, тем самым позволяя существенно снизить вычислительные затраты.

Описанные в статье рекуррентные процедуры могут использоваться так же как средство ускорения сходимости применяемых базовых процедур, необязательно второго порядка. В этом случае ускоряющие шаги выполняются периодически на основе эффективных методов нелинейного программирования второго порядка [10, 14, 15]. Например, можно осуществлять минимизацию целевого функционала методом сопряженных градиентов, а после накопления необходимой информации о матрице Гессе делать несколько шагов эффективным методом второго порядка, рассчитанным на работу в невыпуклой ситуации [15]. При этом мы исходим из того, что большая часть прикладных задач оптимизации оказываются невыпуклыми, и методы типа сопряженных градиентов на невыпуклых участках могут резко снижать свою эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vabishchevich P.N. Factorized schemes of second-order accuracy for numerically solving unsteady problems // *Computational Methods in Applied Mathematics*. 2017. Vol. 17. No. 2. Pp. 323–335.

2. Кубланов М.С. Об одной из причин получения неустойчивых решений при применении вычислительных методов в механике // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиа-*

ции. 2016. № 223 (1). С. 28–36.

3. Свириденко А.Б., Зеленков Г.А. Взаимосвязь и реализация квазиньютоновских и ньютоновских методов безусловной оптимизации // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 1. С. 55–78.

4. Gutiérrez V., Rieiro I., Carsh M., Ruano O.A. Newton method for the optimization of a new constitutive equation for the plastic flow dependent on the strain // *Revista de Metalurgia*. Madrid, 2013. Vol. 49. No. 5. Pp. 378–396.

5. Huang Y., Chen D. Newton-based inverse model for internal model control // *ICIC Express Letters, Part B: Applications*. 2015. Vol. 6. No. 9. Pp. 2565–2570.

6. Ivorra B., Manuel Ramos A., Mohammadi B. A multi-layer line search method to improve the initialization of optimization algorithms // *European Journal of Operational Research*. 2015. Vol. 247. No. 3. Pp. 711–720.

7. Gocic M., Sadovic E. Software for application of Newton-Raphson method in estimation of strains in prestressed concrete girders // *Computers and Concrete*. 2012. Vol. 10. No. 2. Pp. 121–133.

8. Argyros I.K., Gutiérrez J.M., Magrecán B.A.,

Romero N. Convergence of the relaxed Newton's method // *Journal of the Korean Mathematical Society*. 2014. Vol. 51. No. 1. Pp. 137–162.

9. Алберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. М.: Наука, 1977.

10. Аоки М. Введение в методы оптимизации. М.: Мир, 1977.

11. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979.

12. Уилкинсон Дж.Х. Алгебраическая проблема собственных значений. М.: Наука, 1970.

13. Болнокин В.Е., Чинаев П.И. Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. Алгоритмы и программы. М.: Радио и связь, 1986.

14. Черноруцкий И.Г. Методы параметрической оптимизации в задачах идентификации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. № 2 (76). С. 150–155.

15. Черноруцкий И.Г. Параметрические методы синтеза систем управления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. № 2 (76). С. 111–115.

Статья поступила в редакцию 22.06.2017.

REFERENCES

1. Vabishchevich P.N. Factorized schemes of second-order accuracy for numerically solving unsteady problems. *Computational Methods in Applied Mathematics*, 2017, Vol. 17, No. 2, Pp. 323–335.

2. Kublanov M.S. On one of the reasons of the instability of the solutions in applying computational methods in mechanics. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grajdanskoiyaviacii* [Civil Aviation High Technologies], 2016, No. 223 (1), Pp. 28–36. (rus)

3. Sviridenko A.B., Zelenkov G.A. Vzaimosvaz i realizacia kvazinutonovskih i nutonovskih metodov bezuslovnoi optimizacii [Correlation and realization of quasi-Newton methods of absolute optimization]. *Komputernie issledovania i modelirovanie* [Computer Research and Modeling], 2016, Vol. 8, No. 1, Pp. 55–78. (rus)

4. Gutiérrez V., Rieiro I., Carsh M., Ruano O.A. Newton method for the optimization of a new constitutive equation for the plastic flow dependent on the strain. *Revista de Metalurgia*. Madrid, 2013, Vol. 49, No. 5, Pp. 378–396.

5. Huang Y., Chen D. Newton-based inverse model for internal model control. *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, 2015, Vol. 6, No. 9, Pp. 2565–2570.

6. Ivorra B., Manuel Ramos A., Mohammadi B.

A multi-layer line search method to improve the initialization of optimization algorithms. *European Journal of Operational Research*, 2015, Vol. 247, No. 3, Pp. 711–720.

7. Gocic M., Sadovic E. Software for application of Newton-Raphson method in estimation of strains in prestressed concrete girders. *Computers and Concrete*, 2012, Vol. 10, No. 2, Pp. 121–133.

8. Argyros I.K., Gutiérrez J.M., Magrecán B.A., Romero N. Convergence of the relaxed Newton's method. *Journal of the Korean Mathematical Society*, 2014, Vol. 51, No. 1, Pp. 137–162.

9. Albert A. *Regressiya, psevdoinversiya i rekurrentnoye otsenivaniye* [Regression, pseudo-inversion and recurrent estimation]. Moscow: Nauka Publ., 1977. (rus)

10. Aoki M. *Vvedeniye v metody optimizatsii* [Introduction to optimization methods]. Moscow: Mir Publ., 1977. (rus)

11. Grop D. *Metody identifikatsii system* [Methods for identifying systems]. Moscow: Mir Publ., 1979. (rus)

12. Uilkinson Dzh.Kh. *Algebraicheskaya problema sobstvennykh znacheniy* [Algebraic eigenvalue problem]. Moscow: Nauka Publ., 1970. (rus)

13. Bolnokin V.Ye., Chinayev P.I. *Analiz i sintez system avtomaticheskogo upravleniyana EVM*.

Algoritmy i programmy [Analysis and synthesis of automatic control systems on a computer. Algorithms and programs]. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1986. (rus)

14. **Chernorutskiy I.G.** Metody parametricheskoy optimizatsii v zadachakh identifikatsii [Methods of parametrical optimisation in identification problems]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal.*

Computer Science. Telecommunication and Control Systems, 2009, No. 2 (76), Pp. 150–155. (rus)

15. **Chernorutskiy I.G.** Parametricheskiye metody sinteza system upravleniya [Parametrical methods of synthesis of control systems]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2009, No. 2 (76), Pp. 111–115. (rus)

Received 22.06.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЧЕРНОРУЦКИЙ Игорь Георгиевич

CHERNORUTSKIY Igor G.

E-mail: igcher1946@mail.ru

КОТЛЯРОВ Всеволод Павлович

KOTLYAROV Vsevolod P.

E-mail: vpk@spbstu.ru

DOI: 10.18721/JCSTCS.11105

УДК 656, 007; 004.81, 614.8; 007; 51-7, 351; 351.81; 351.78; 621.396.21; 004.42

РАЗВИТИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОЦЕДУР АНАЛИЗА СОЦИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ГОРОДСКОГО НАСЕЛЕНИЯ

Я.А. Селиверстов¹, Г.Ю. Гергель², С.А. Селиверстов¹, К.В. Никитин³

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

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведен анализ использования сотовой связи в составе интеллектуальных транспортных систем для сбора информации о транспортных потоках и подвижности населения. В теоретико-множественной интерпретации впервые разработана модель системы мониторинга социальной активности городского населения. Работоспособность модели продемонстрирована на примере мобильного приложения «Городской навигатор». Приложение разработано в среде Xcode 9 на языке Swift 3, система анализа данных — на Python 3.X. Приложение служит источником информации для прокладки маршрутов предпочтительного следования и позволяет проводить оценку качества объектов городской системы, учитывать инфраструктурную, транспортную, потребительскую, локационную, медиа-событийную (фоторегистрация) и рекомендательно-новостную (комментарии) активность пользователей, а также строить GPS-треки пользователей в привязке к ЕСККТЭСИ и МКБ-10 с классификацией межобъектных отношений. Продemonстрирована возможность интеграции мобильного приложения с системами транспортного моделирования и управления. Обозначены практические ориентиры дальнейшего использования мобильных приложений в составе интеллектуальных транспортных систем.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы; мобильные приложения для транспорта; матрицы транспортных корреспонденций; цепочки транспортной активности; умный город; транспортное поведение; транспортный мониторинг; классификация транспортных потоков.

Ссылка при цитировании: Селиверстов Я.А., Гергель Г.Ю., Селиверстов С.А., Никитин К.В. Развитие интеллектуальных транспортных систем на основе мобильных технологий и процедур анализа социальной активности городского населения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 1. С. 47–64. DOI: 10.18721/JCSTCS.11105

IMPROVEMENT OF INTELLECTUAL TRANSPORT SYSTEMS BY MOBILE TECHNOLOGIES AND PROCEDURES OF ANALYSIS OF SOCIAL ACTIVITY OF URBAN POPULATION

Ya.A. Seliverstov¹, G.Yu. Gergel², S.A. Seliverstov¹, K.V. Nikitin³

¹IPT RAS, St. Petersburg, Russian Federation;

²St. Petersburg State University of Civil Aviation, St. Petersburg, Russian Federation;

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

We have analyzed cellular communication as part of intelligent transport systems to collect information on traffic flows and mobility of the population. A model of the monitoring system of social activity of urban population is developed in the set theory interpretation. The reliability of the model is demonstrated on the example of the mobile application «City Navigator». The application is developed in the Xcode 9 environment in Swift 3, and the data analysis system is developed in Python 3.X. The application allows to assess the quality of urban system objects and take into account the infrastructure, transport, consumer, location, mediaevents (photoregistration) and news recommendations (comments) of user activity, and draw users' GPS tracks in accordance with the USCCTEI and ICD-10 with the classification of interobject relations. The possibility of integrating a mobile application with transport modeling and control systems is demonstrated. The practical guidelines for further use of mobile applications as part of intelligent transport systems are indicated.

Keywords: intelligent transport systems; mobile applications for transport; transport correspondence matrices; transport activity chains; smart city; transport behavior; transport monitoring; traffic classification.

Citation: Seliverstov Ya.A., Gergel G.Yu., Seliverstov S.A., Nikitin K.V. Improvement of intellectual transport systems by mobile technologies and procedures of analysis of social activity of urban population. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 1, Pp. 47–64. DOI: 10.18721/JCSTCS.11105

Введение

С ростом населения мегаполисов, усложнением социальных процессов, стремительным развитием мобильных и интернет-технологий подходы к организации и управлению городскими транспортными системами претерпевают значительные изменения. Традиционное городское и региональное управление транспортом требует ускоренного перехода к интеллектуальным и когнитивным транспортным системам [1], способным качественно преобразовать городскую среду и социальную активность населения. Системы подобного класса должны обладать исчерпывающим количеством необходимой информации по широкому кругу деятельности и обеспечивать возможность ее «умного» сбора, приема-передачи, обработки, анализа, хранения и использования.

Особую важность представляет информация о социальной активности городского населения. Именно эта информация способна развивать интеллектуальные транспортные системы в границах технологических решений, направленных на максимизацию функции субъективной транспортной полезности каждого пользователя.

К таким технологическим решениям

можно отнести пользовательские приложения, построенные на основе методов прокладки маршрутов предпочтительного следования [2], методов управления дорожным движением на основе целевых ориентиров пользователей и транспортной системы [3], методов анализа классификаторной структуры транспортного потока [4] и индивидуальных характеристик пользователей [5], методов интеллектуальной маршрутизации транспортных средств городских служб [6, 7], методов предупреждения причин возникновения ДТП [8–10], технологий дополненной реальности [11, 12], методов моделирования транспортных потоков [13] на основе восстановления матриц транспортных корреспонденций [14] с учетом показателей транспортной обеспеченности [15, 16] и цепочек социальной активности городского населения [17] и мн. др.

Массовое развитие точек беспроводного интернет-доступа [18] и вхождение в повседневную жизнь горожан сотовой связи как активного средства электронной коммуникации позволяет рассматривать именно ее в качестве достоверного источника оперативной статистической информации для нужд города.

Анализ предметной области

Среди последних научно-исследовательских работ, в которых рассмотрены вопросы использования систем сотовой связи в составе интеллектуальных транспортных систем, отметим следующие. В [19] чилийские ученые произвели построение системы мониторинга общественного транспорта в компании Transantiago на основе систем GPS с целью сокращения времени ожидания пассажиров. На первом этапе осуществляется сбор GPS-данных с пассажирских автобусов и вычисляется величина рассогласования маршрутного расписания и реального времени прибытия автобуса на остановку, вводятся индексы оценки качества транспортного обслуживания, в соответствии с которыми производится оценка уровня обслуживания пассажиров.

В работе [20] международным научным коллективом из представителей Пакистана, США и Китая рассмотрены программные приложения и сервисы, основанные на определении местоположения пользователя (LBS). Научным коллективом осуществлена разработка адаптивной стратегии сопоставления маршрутных карт в реальном времени (RT-MM) в облачной среде для решения ключевой задачи поиска кратчайшего пути. В процессе сопоставления траекторий GPS от транспортных средств в реальном времени минимизирована ошибка точности местоположения. Произведено программное моделирование и тестирование системы на основе как синтетических, так и реальных наборов данных.

В [21] португальскими учеными осуществлена разработка нового инструмента для количественной оценки загрязнения воздуха транспортными потоками на основе траекторного анализа передвижения людей по данным GPS, полученным от мобильных телефонов. В работе [22] израильскими учеными исследована возможность использования агрегирующих данных, полученных от приемников GPS, для оценки влияния туристов и посетителей на достопримечательные места. В [23] предложен способ сбора данных о дорожном движении в режиме реального времени с использованием

систем сотовой связи 3G и 4G и их оценки с использованием нейронной сети.

Анализ предметной области показал, что передовые системы управления транспортом должны быть тесно связаны с социальной активностью населения, а она, в свою очередь, с мобильными потребительскими, информационно-сетевыми и расчетно-денежными системами [9].

Анализ предметной области свидетельствует о значительных успехах в развитии прикладных решений, направленных на построение систем мониторинга социальной активности населения. Подобные системы позволяют производить построение баз знаний smart-мобильности.

Информацию баз знаний smart-мобильности впоследствии можно использовать для построения систем прокладки предпочтительных маршрутов следования [2], т. е. прокладывать маршруты следования не только самые короткие по расстоянию или по времени, но и учитывать при прокладке множество персональных критериев. К таковым можно отнести: «безынкционные маршруты» — маршруты, по которым не перемещаются люди, инфицированные инфекционными заболеваниями; «маршруты для знакомств» — маршруты, по которым перемещаются незамужние девушки или молодые люди; «безопасные маршруты» — маршруты, на которых не были зарегистрированы события криминального характера; и мн. др.

Информация о структуре транспортного потока по гендерным и трудовым (специальность, образование) характеристикам расширит инструментарий транспортно-отраслевого моделирования и позволит производить оптимизацию транспортных потоков по критериям трудовой принадлежности. Также, располагая информацией от пользователей о качестве транспортной инфраструктуры, городские службы способны оперативно контролировать качество городского обслуживания населения.

Постановка проблемы

Таким образом, для оперативного анализа социальной активности населения требуется:

1) информация в режиме реального времени о транспортных перемещениях населения в виде GPS-треков;

2) классификация социальной структуры населения, мест, являющихся целями поездок, и причин, обуславливающих транспортную активность жителей;

3) информация о том, каким видом транспорта перемещается городской житель;

4) информация о социальной деятельности и наименовании места нахождения городского жителя в реальный момент времени;

5) оперативная оценка качества транспортного обслуживания населения и мест локаций, в которых находится городской житель.

На основе полученной информации станет возможным произвести восстановление матриц транспортных корреспонденций и дневных цепочек социальной активности населения.

Основная часть

Изложение уместно начать с ввода формального определения социальной активности и построения формальной модели системы мониторинга социальной активности городского населения (далее — система). Под формальной социальной активностью пользователя будем понимать совокупность социально-экономических, потребительских, транспортных, поведенческих, информационно-сетевых и других активностей пользователя, которые способны зарегистрировать существующие мобильные информационные системы.

Формальную модель F^M системы зададим следующим набором функционалов:

$$F^M = \langle \hat{F}_D; \hat{F}_N; \hat{F}_C; \hat{F}_T; \hat{F}_R \rangle_T \quad (1)$$

где $\hat{F}_D : H_C \oplus_{f_b} O_S = H_D$ — функционал директивизаций, который каждому жителю из множества города H_C ставит в соответствие директивный элемент системы O_S или мобильное устройство сотовой связи и переводит его во множество пользователей H_D ; $\hat{F}_N : H_D \rightarrow N$ — функционал идентификации элементного множества H_C , который

каждому объекту из $\mathcal{E}^T$ ставит в соответствие идентификатор или набор идентификаторов из множества N ; $\hat{F}_C : H_D \times N \rightarrow CH$ — функционал характеристической параметризации пользователей H_D , который каждому пользователю из H_D с уникальным номером из N ставит в соответствие наборы характеристик CH , присущих данному пользователю, таких что $CH = \{ch_\pi^{h_u}, \pi = 1, \dots, N_\pi\}$ — множество характеристик пользователей CH , причем $ch_\pi^{h_u}$ задается кортежем $ch_\pi^{h_u} = \langle name, \{value\} \rangle$, где $name$ — имя π -й характеристики, $\{value\}$ — значение π -й характеристики из множества характеристик Π ; $\hat{F}_T : H_D \rightarrow [\tau_T^{def} \vee (\tau_T; \tau_{T+1})]$ — временной оператор, который каждому объекту из H_D ставит в соответствие определенный момент или интервал времени из множества моментов или интервалов времени T , на котором задано отношение строгого порядка, то есть $\tau_1 < \tau_2, \dots, \tau_T < \tau_{T+1}$; $\tau_T^{def} \in T$ — определенный момент времени; $\hat{F}_S : H_D \times CH \times N \rightarrow DATE$ — оператор транзакций, который информацию о пользователе из H_D с идентификатором из N и характеристиками CH переводит в данные $DATE$.

Тогда целевая функция субъективной транспортной полезности Φ^M пользователей H_D , определяемая их транспортно-логистическим поведением B_D , будет стремиться к максимуму по мере прироста информации $DATE$ от $\hat{F}_S$, согласно:

$$\Phi^M : B_D \times_{\hat{F}_S} DATE \rightarrow \Phi_{\max}^M. \quad (2)$$

Теперь перейдем к процедурам восстановления матриц транспортных корреспонденций и цепочек транспортной активности пользователей.

Процедуру создания матриц корреспонденций ρ_{ijh} запишем в виде:

$$\rho_{ijh(tr)} = Card(L) \Big|_{t = def}, \quad (3)$$

$$\{(x_{lt}^d; y_{lg}^d)\} = \begin{cases} \in L \rightarrow Card L \\ \notin L \rightarrow \emptyset \end{cases}$$

где $\{(x_{lt}^d; y_{lg}^d)\}$ — множество GPS-координат пользователей; lt (latitude) — широта; lg (longitude) — долгота; i, j — индекс места зарождения и назначения транспортной

(социальной) активности пользователя; tr — индекс используемого в процессе транспортной активности транспортного средства; h — индекс пользователя; L — пространственная область, характеризующая место зарождения транспортного потока; $Card(L)$ — кардинальное число или мощность множества L , элементами которого являются пары GPS-координат пользователей.

С использованием информации от мобильных устройств пользователей производится расчет транспортного потока из места района отправления в места района прибытия в режиме реального времени в границах тринейной модели [14]. Интеллектуальный анализ транспортного потока в данном случае целесообразно проводить с учетом демографических и структурных показателей, степени подвижности населения и потребительской активности в привязке к классификаторам ЕСККТЭСИ¹ [5].

Расчет может производиться отдельно для каждого слоя спроса, а значит, для каждой пары действий с ее основными группами [14].

Цепочки социальной активности [17] пользователей зададим множеством динамических агентных графов, выраженных через транспортно-логистическое поведение пользователей B_D .

Тогда каждому пользователю $h_i \in H_D$ можно поставить в соответствие его транспортно-логистическое поведение (социальную активность) $B_i^{h_i} \in B_D$, согласно:

$$B_i^{h_i} = \Gamma_i^{h_i} \left(\left(\begin{array}{l} \Gamma_i^{GPS}(V; E) \cup \Gamma_i^L(V; E) \cup \\ \cup \Gamma_i^N(V; E) \cup \Gamma_i^T(V; E) \cup \\ \cup \Gamma_i^E(V; E) \cup \Gamma_i^Q(V; E) \cup \\ \cup \Gamma_i^F(V; E) \cup \Gamma_i^C(V; E) \end{array} \right); T \right) \quad (4)$$

где $\Gamma_i^{h_i}((...); T)$ — граф социальной активности пользователя h_i ; $\Gamma_i^{GPS}(V; E)$ — граф

пространственной активности пользователя h_i ; $\Gamma_i^L(V; E)$ — граф инфраструктурной активности пользователя h_i ; $\Gamma_i^N(V; E)$ — граф потребительской активности пользователя h_i ; $\Gamma_i^E(V; E)$ — граф распорядка питания пользователя h_i ; $\Gamma_i^T(V; E)$ — граф транспортной активности пользователя h_i ; $\Gamma_i^Q(V; E)$ — граф оценки качества объектов городской системы пользователем h_i ; $\Gamma_i^F(V; E)$ — граф медиа-событийной активности пользователя h_i ; $\Gamma_i^C(V; E)$ — граф рекомендательно-новостной активности пользователя h_i .

Таким образом, выделяя в графе социальной активности пользователя составные графы, становится возможным производить анализ социальной активности пользователя через инфраструктурную, потребительскую, транспортную, пространственную и другие составляющие (4) с учетом ранговой оценки качества каждой из них.

Практическая реализация

Программно-алгоритмическая реализация мобильного приложения для учета социальной активности пользователей разрабатывается в среде Xcode 9 на языке Swift 3, а система анализа данных — на Python 3.X. Мобильное приложение получило название «Городской навигатор». Разработка приложения осуществлялась в несколько этапов.

На первом этапе в соответствии с поставленными задачами разрабатывалась концептуальная схема приложения, определялись ее основные компоненты:

Firestore — база данных в формате .json;
 imagesArray[] — база данных изображений (фото);
 commentsArray[] — база данных комментариев пользователя;
 ratingArray[] — оценка качества события пользователем;
 allUsersData[] — все данные о пользователях;
 time — время регистрации события в формате Число.Месяц.Год.Часы.Минуты;
 coordinate — координаты долготы и широты в формате GPS.

Концептуальная схема мобильного приложения «Городской навигатор» представлена на рис. 1.

¹ ЕСККТЭСИ — Единая система классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации.

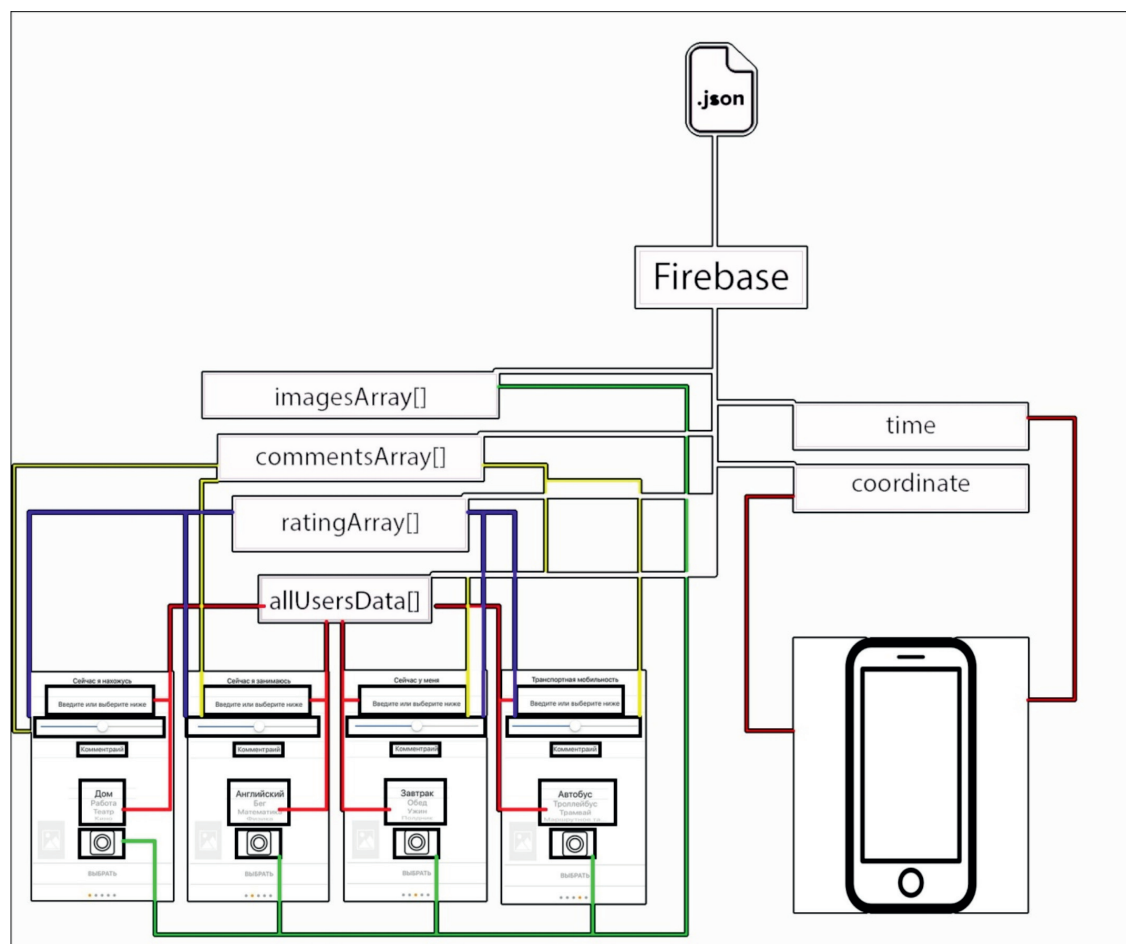


Рис. 1. Схема мобильного приложения «Городской навигатор»

Fig. 1. Scheme of the mobile application «City Navigator»

На втором этапе создавался интерфейс мобильного приложения. Интерфейс мобильного приложения состоит из шести «экранов-вкладок». Внешний вид «экранов-вкладок» представлен на рис. 2.

Каждая вкладка содержит шаблоны ответов и поля для заполнения, которые отражают определенный набор характеристик, присущий определенному виду деятельности или состоянию пользователя. Пользователь самостоятельно заполняет необходимую информацию о себе.

Также пользователь имеет возможность оставить комментарий и произвести фото-регистрацию события, которое относится к информации, отраженной в данной вкладке.

На втором этапе разрабатывается про-

граммное обеспечение приложения, согласно формальной модели (1): программируются кнопки, задается логика и прописываются обработчики событий. Программно-операторный функционал мобильного приложения представлен на рис. 3.

Слева представлены данные, а справа — блоки кода, ответственные за их получение; сверху подписаны операторы и функционалы формальной модели (1).

Функционал идентификации элементного множества F_N , входящий в (1), работает со следующими идентификаторами: $N = \{n_1; n_2; n_3\}$ — множество идентификаторов, где n_1 — адрес электронной почты; n_2 — номер мобильного телефона абонента; n_3 — IP мобильного телефона.

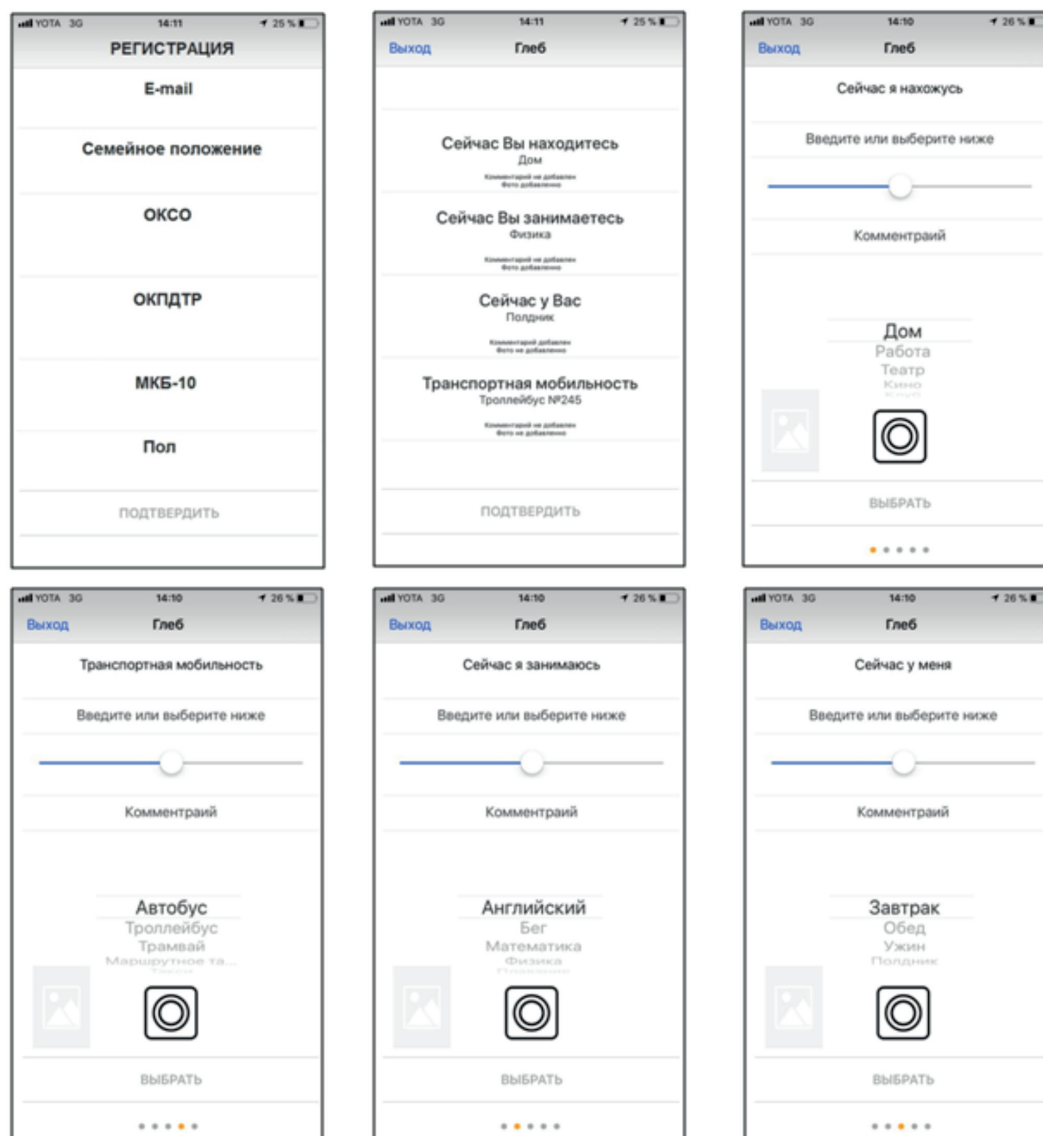


Рис. 2. Интерфейс мобильного приложения «Городской навигатор»

Fig. 2. The interface of the mobile application «City Navigator»

Функционал характеристической параметризации пользователей $\hat{F}_C$, входящий в (1), работает со следующими характеристиками:

$CH = \{ch_1; ch_2; ch_3; ch_4; ch_5; ch_6; ch_7; ch_8\}$ — множество регистрируемых характеристик, где ch_1 — Классификаторы; ch_2 — Локация; ch_3 — Занятие; ch_4 — Прием пищи; ch_5 — Транспорт; ch_6 — День, Месяц, Год, Часы, Минуты; ch_7 — координаты GPS; ch_8 — Фото; ch_9 — Оценка; ch_{10} — Персональный комментарий;

$$ch_1 = \left\{ \begin{array}{l} \text{МКБ – 10, Пол, ОКПДТР, ОКСО,} \\ \text{Семейное положение} \end{array} \right\}$$

$$ch_2 = \left\{ \begin{array}{l} \text{Дом, Работа, Театр, Кино, Клуб,} \\ \text{Парк, Стадион, Дорога,} \\ \text{Фитнес-центр, Больница,} \\ \text{Поликлиника, Аптека,} \\ \text{Университет, Школа, Колледж,} \\ \text{Магазин, Торговый центр,} \\ \text{Библиотека, ...} \end{array} \right\}$$

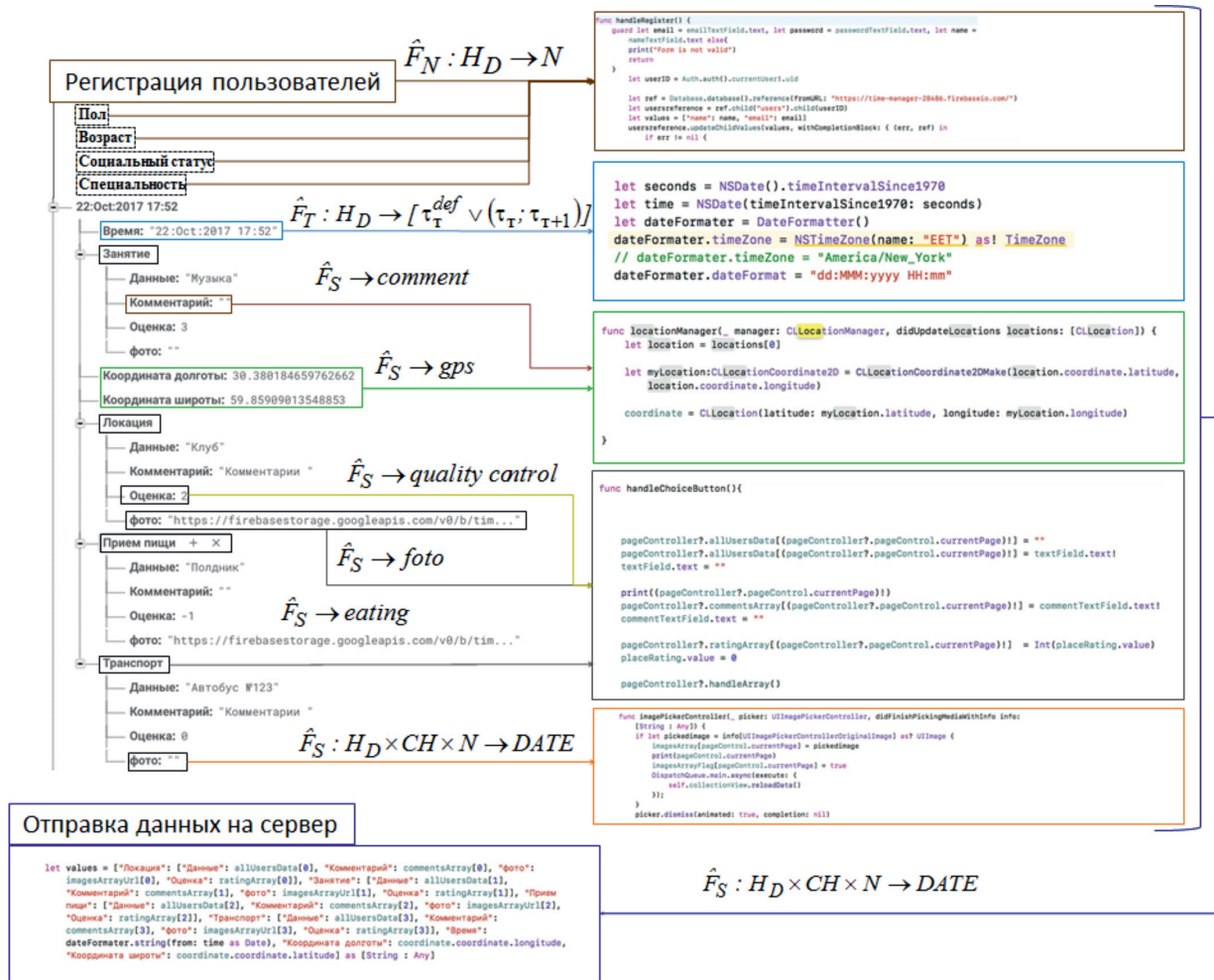


Рис. 3. База данных и блоки кода приложения «Городской навигатор»

Fig. 3. Database and code blocks of the application «City Navigator»

- $ch_3 = \left\{ \begin{array}{l} \text{Английский, Бег, Математика,} \\ \text{Физика, Плавание,} \\ \text{Музыка, Сон, Покупки,} \\ \text{Интернет, Чтение книг,} \\ \text{Сноуборд, Горные лыжи,} \end{array} \right\}$
- $ch_4 = \left\{ \begin{array}{l} \text{Завтрак, Обед, Полдник, Ужин,} \\ \text{Перекус} \end{array} \right\}$
- $ch_5 = \left\{ \begin{array}{l} \text{Автобус, Трамвай, Троллейбус,} \\ \text{Маршрутное такси, Такси,} \\ \text{Метро, Пеший ход, Велосипед,} \\ \text{Самокат, Ролики, Мотоцикл,} \\ \text{Катер,} \end{array} \right\}$

$ch_6, ch_7, ch_8, ch_9, ch_{10}$ — формируются пользователем или вычисляются функционалом приложения в процессе его работы.

Оператор транзакций $\hat{F}_S$, согласно (1), формирует следующие данные $DATE$:

- $DATE = \left\{ \begin{array}{l} \text{Данные, Комментарий, Оценка,} \\ \text{Фото, Координаты долготы,} \\ \text{Координаты широты, Время,} \\ \text{GPS-треки (классификаторные)} \end{array} \right\}$

Структура базы данных мобильного приложения «Городской навигатор» представлена на рис. 4, а база данных в соответствии с данной структурой представлена в табл 1.

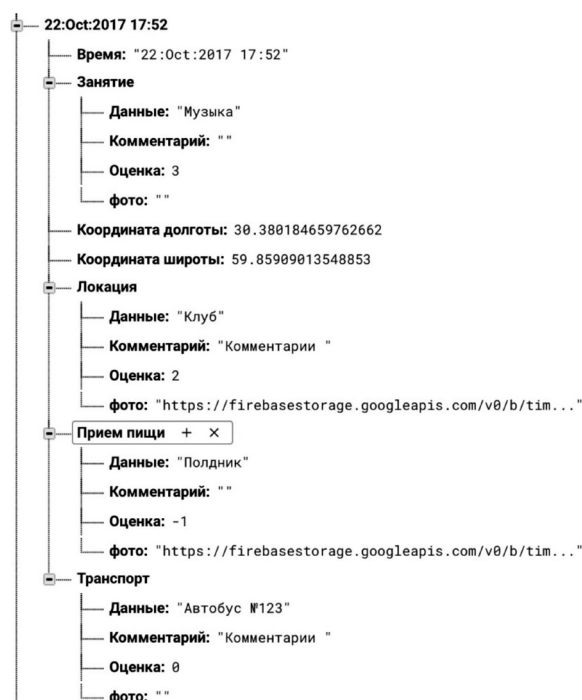


Рис. 4. Структура базы данных приложения «Городской навигатор»

Fig. 4. Structure of the database of the application «City Navigator»

Таблица 1

База данных мобильного приложения «Городской навигатор»

Table 1

Database mobile application «City Navigator»

Дата и время		22: Oct: 2017 17:52	
Занятие		Данные	Музыка
		Комментарии	—
		Оценка	3
		Фото	—
Локация		Данные	Клуб
		Комментарии	Комментарии
		Оценка	2
		Фото	https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/tim
Прием пищи		Данные	Полдник
		Комментарии	--
		Оценка	—1
		Фото	https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/tim
Транспорт		Данные	Автобус 123
		Комментарии	Комментарии
		Оценка	0
		Фото	—
Координата долготы	30.380184659762662		
Координата широты	59.85909013548853		

Социальную активность пользователя (рис. 5), согласно (4), определим посредством мобильного приложения как совокупность регистрируемых элементарных актов различного вида деятельности, сгруппированных в базе данных (рис. 4). Блоки «Оценка», «Комментарии» и «Фото» в отношении каждого блока «Локация», «Транспорт», «Занятие», «Прием пищи» позволяют произвести оценку на предмет

привлекательности того или иного объекта или вида деятельности.

Таким образом, задача максимизации субъективной функции полезности $\Phi_{\max,t}^{M(h_i)}$ для каждого пользователя, согласно (2), будет сводиться к выбору транспортно-логистического поведения $B_t^{h_i}$, пролегающего в границах объектов с характеристиками максимальной оценки качества:

$$\begin{array}{c} B_t^{h_i} \times \hat{F}_S \times DATE \\ \hline CH \end{array} \rightarrow \max \rightarrow \Phi_{\max,t}^{M(h_i)} \quad (5)$$

$$ch_9 \rightarrow \max$$

$$ch_{10}, ch_8 \rightarrow 1 = pref(h_i)$$

где $B_t^{h_i}$ — транспортно-логистическое поведение пользователя h_i ; $DATE$ — данные всех пользователей об их социальной активности с учетом субъективных оценок (ch_8 , ch_9 , ch_{10}); $\Phi_{\max,t}^{M(h_i)}$ — функция субъективной полезности пользователя h_i ; $pref(h_i)$ — субъективное предпочтительное значение для пользователя h_i , $pref(h_i) = 1$ — нравится, 0 — не нравится.

GPS-треки в приложении «Городской навигатор» строятся в привязке к классификаторам ОКПДТР, ОКИН (Пол, Семейное положение), ОКСО из ЕСККТЭСИ и МКБ-10². Рассмотрим сравнение результатов построения GPS-треков в приложении «Городской навигатор» и в навигаторе Яндекс.

Пример. Данные для регистрации пользователя в приложении «Городской навигатор»: адрес электронной почты, МКБ-10: J30.0 — Вазомоторный ринит; Пол: М; ОКПДТР: 24047 — Менеджер; ОКСО: 080507 — Менеджмент организации; Семейное положение: Холост. Данные для регистрации пользователя в Яндекс. Навигатор: номер мобильного телефона. Модуль построения GPS-треков в «Городском на-

вигаторе» выполнен на языке Python 3.X. с использованием пакета Google Maps APIs.

Требуется сравнить по информативности GPS-треки пользователя, построенные с использованием систем Яндекс. Навигатор и «Городской навигатор».

Решение. Результаты построения GPS-треков с использованием систем Яндекс. Навигатор и «Городской навигатор» представлены в табл. 2, а сравнение GPS-треков данных систем по уровню информативности представлено в табл. 3.

Таким образом, мобильное приложение «Городской навигатор» превосходит по уровню информативности существующие пешеходные навигаторы. Интеграция в мобильное приложение классификаторов из ЕСККТЭСИ и МКБ-10 позволяет использовать его в составе мобильной компоненты системы государственной региональной оперативной транспортной статистики. Отсутствие подобных решений у Яндекса можно объяснить запаздыванием процесса внедрения результатов фундаментальных исследований в области направления Transport behavior science.

Ввиду того, что модуль анализа данных мобильного приложения «Городской навигатор» выполнен на языке Python 3.X, возможна его программная интеграция с системами транспортного моделирования, такими

² МКБ-10 — Международная классификация болезней 10-го пересмотра.

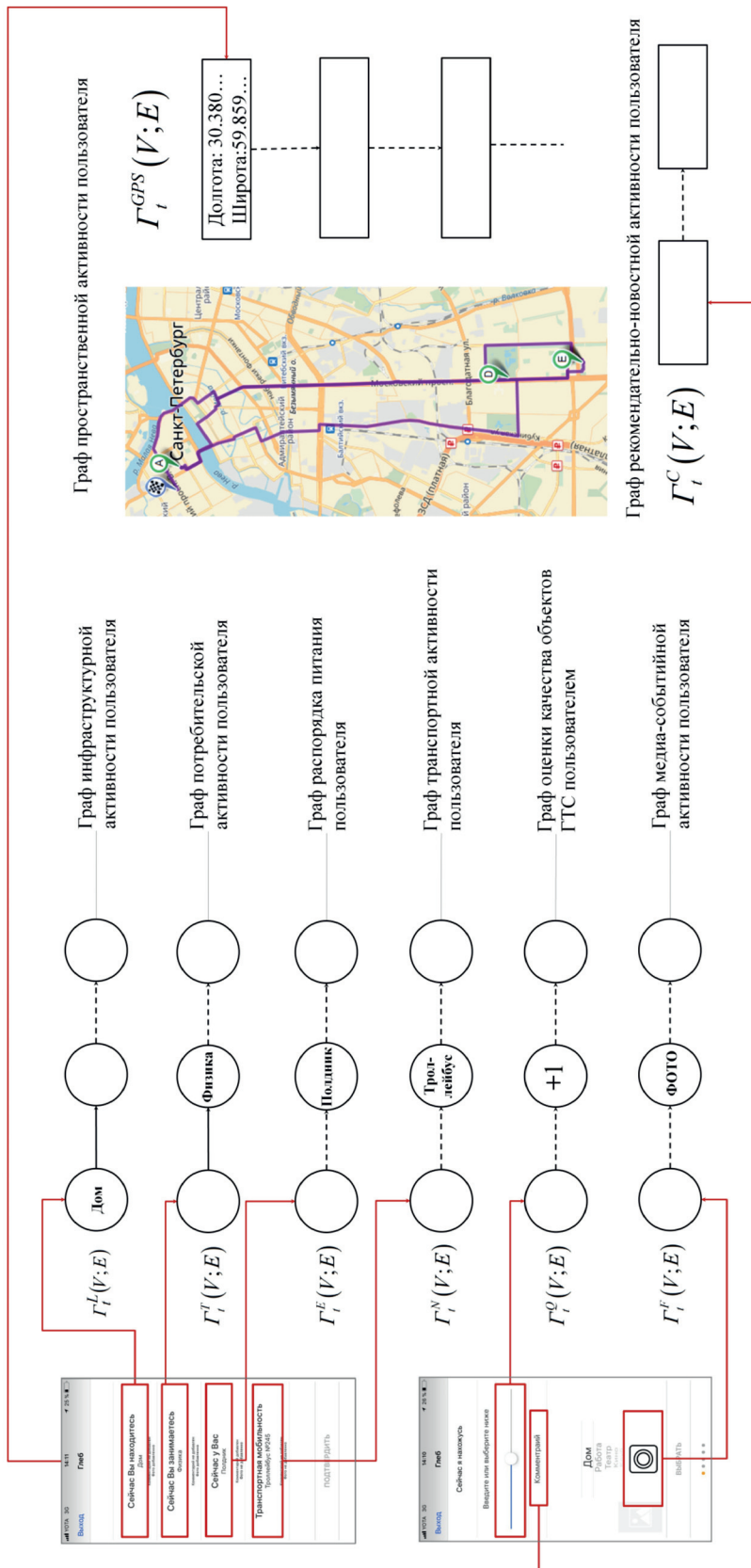


Рис. 5. Социальная активность пользователя

Fig. 5. Social activity of the user

Таблица 2

Сравнение GPS-треков пользователя, построенных с использованием систем Яндекс. Навигатор и «Городской навигатор»

Table 2

Comparison of GPS tracks of the user, built using Yandex. Navigator and Urban Navigator

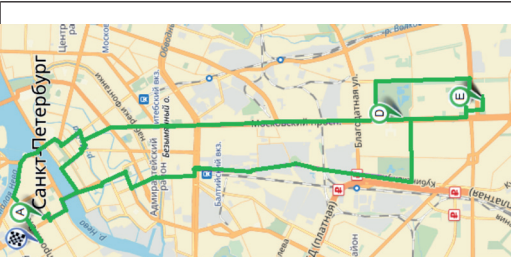
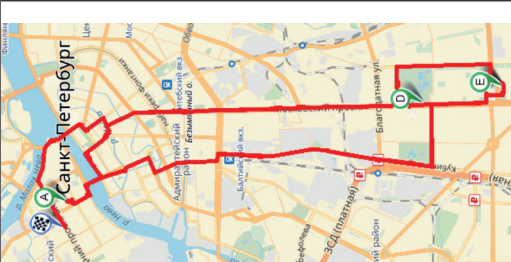
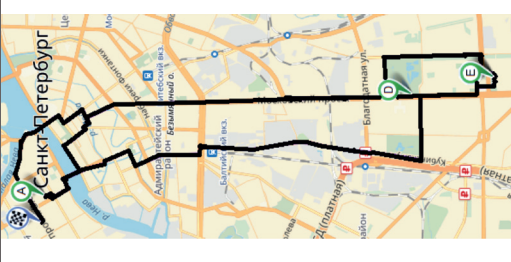
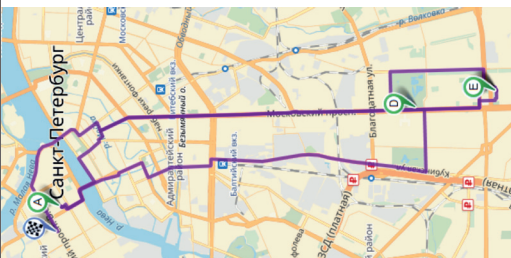
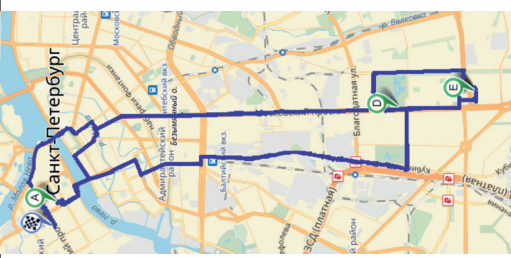
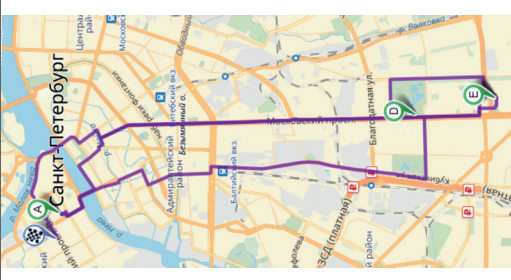
Анализ трека пользователя с использованием системы Яндекс. Навигатор	Анализ трека пользователя с использованием системы «Городской навигатор»					
GPS-трек						
Номер абонента	МКБ-10: Вазомоторный ринит	Пол: М	ОКПДТР: Менеджер	ОКСО: Менеджмент организации	Семейное положение: Холост	
						
						



Таблица 3

GPS-трекеры систем Яндекс. Навигатор и «Городской навигатор»

Table 3

GPS trackers Yandex. Navigator and City Navigator

Функциональные особенности GPS-трекера	Yandex. Навигатор	«Городской навигатор»
Возможность определения GPS-трека пользователя	Да	Да
Возможность определения потенциально опасных (инфицированных) GPS-треков пользователей	Нет	Да
Возможность определения GPS-треков пользователей в зависимости от гендерного признака	Нет	Да
Возможность определения GPS-треков пользователей в зависимости от вида трудовой деятельности и должностного положения	Нет	Да
Возможность определения GPS-треков пользователей в зависимости от специальности по образованию	Нет	Да
Возможность определения GPS-треков пользователей в зависимости от семейного положения	Нет	Да
Возможность персональной оценки объектов и мест на маршруте	Нет	Да
Возможность персонального комментирования объектов и мест на маршруте	Нет	Да
Возможность фоторегистрации событий, объектов и мест на маршруте	Нет	Да

как PTV Vission. Это позволяет перейти к процедурам «достоверного» восстановления матриц транспортных корреспонденций, согласно (3), и цепочек транспортной активности пользователей, согласно (4).

Структурная схема интеграции мобильного приложения с системами транспортного моделирования представлена на рис. 6. На примере данных о пользователе ОКПДТР 26216 (Руководитель студенческого исследовательского бюро) в среде моделирования возможно производить интеллектуальную маршрутизацию пользователей и классификацию треков транспортных потоков внутри эюр распределения транспортных потоков.

В ходе настоящего исследования разработана модель системы мобильного мониторинга социальной активности город-

ского населения и показана возможность ее интеграции с системами транспортно-экономического моделирования. Социальную активность пользователей, в границах разработанной модели, предложено формировать через инфраструктурную, транспортную, потребительскую, локационную [24], оценочную, медиа-событийную (фоторегистрация) и рекомендательно-новостную (комментарии) составляющие активности. В качестве идентификаторов пользователей впервые используются классификаторы из ЕСККТЭСИ и МКБ-10. Применение государственных классификаторов в системах мониторинга городской социальной активности впервые позволяет перейти к анализу оперативного государственного статистического учета в границах ЕСККТЭСИ на уровне региона.

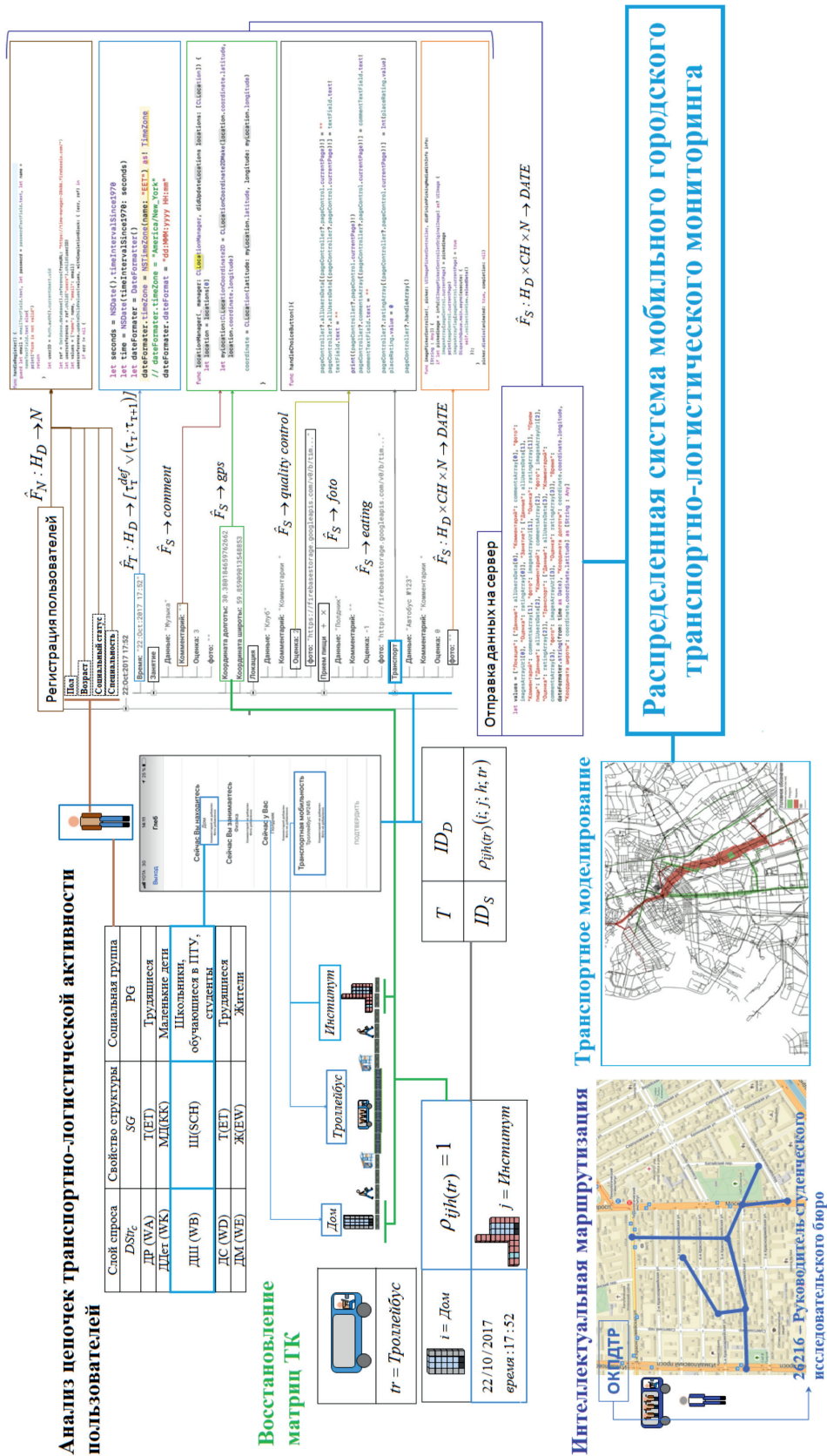


Рис. 6. Интеграция мобильного приложения с системами транспортного моделирования

Fig. 6. Integration of mobile applications with transport modeling systems

Заключение

Работоспособность модели мобильного мониторинга социальной активности городского населения продемонстрирована на примере разработанного мобильного приложения «Городской навигатор».

Таким образом, сращивание мобильных технологий и систем транспортного моделирования, внедрение процедур учета и анализа устойчивой социальной активности населения [25] позволит перейти к распределенным системам городского транспортно-логистического мониторинга, которые способны многократно расширить аналитический базис городских интеллектуальных транспортных систем [26, 27].

Предложенная технология с единых позиций позволит реализовать процесс структурного и функционального анализов транспортной мобильности городского населения в границах принятых систем классификации, расширить существующий базис транспортных индикаторов и показателей [28], лечь в основу информационной базы знаний [29] для построения систем анализа [30] управления и развития мегаполиса [31].

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 16-31-00306 в рамках инициативного научного проекта «Мой первый грант» на тему «Построение модели интеллектуального управления городскими транспортными потоками».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асаул А.Н., Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Аванесов М.Ю. Концептуальные подходы к построению интеллектуальной мультимодальной транспортной системы РФ // Информация и космос. 2016. № 3. С. 8–17.
2. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Метод построения пути субъективного предпочтительного следования // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2016. Т. 4. С. 31–37.
3. Ashim Kumar Debnath, Hoong Chor Chin, Md. Mazharu Haque, Belinda Yuen. A methodological framework for benchmarking smart transport cities // Cities. 2014. Vol. 37. Pp. 47–56.
4. Селиверстов Я.А. О методе анализа структуры смешанного транспортного потока на городской улично-дорожной сети // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2015. № 3 (44). С. 104–111.
5. Paefgen J., Staake T., Thiesse F. Evaluation and aggregation of pay-as-you-drive insurance rate factors: a classification analysis approach // Decis Support Syst. 2013. No. 56. Pp. 192–201.
6. Иванов А.Ю., Комашинский В.И., Малыгин И.Г. Концепция построения единого информационного пространства интеллектуальной мультимодальной транспортной системы // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 6 (67). С. 24–28.
7. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О методе оценки эффективности организации процесса дорожного движения мегаполиса // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 2 (50). С. 91–96.
8. Малыгин И.Г., Сильников М.В. Интеллектуальные системы транспортной безопасности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 1 (29). С. 1–13.
9. Marco Dozza, Nieves Paceda González. Recognising safety critical events: Can automatic video processing improve naturalistic data analyses? // Accident Analysis & Prevention. 2013. Vol. 60. Pp. 298–304.
10. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Использование систем класса ГАТЛОСЭМИ для упреждения причин возникновения ДТП и неблагоприятных социальных исходов в «умном городе» // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2016. № 1 (236). С. 65–81. DOI: 10.5862/JCSTCS.236.7
11. Lotfi Abdi, Faten Ben Abdallah, Aref Meddeb. In-vehicle augmented reality traffic information system: A new type of communication between driver and vehicle // Procedia Computer Science. 2015. No. 73. Pp. 242–249.
12. Feinerand S., MacIntyre B., Hollerer T., Webster A. A touring machine: prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment // Personal Technologies. 1997. Vol. 1(4). Pp. 208–217.
13. Ibai Laca, Ignacio (Icaki) Olabarrieta, Manuel Vélez, Javier Del Ser. On the imputation of missing data for road traffic forecasting: New insights and novel techniques // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2018. Vol. 90. Pp. 18–33.
14. Hazelton M.L. Statistical inference for time varying origin–destination matrices // Transportation Research. Part B: Methodological. 2008. Vol. 42.

Iss. 6. Pp. 542–552.

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

16. **Andrea Souza Santos, Suzana Kahn Ribeiro** The role of transport indicators to the improvement of local governance in Rio de Janeiro City: a contribution for the debate on sustainable future // Case Studies on Transport Policy. 2015. Vol. 3. Iss. 4. Pp. 415–420.

17. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Формальное построение цепочек транспортной активности городского населения // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 4 (224). С. 91–104. DOI: 10.5862/JCSTCS.224.9

18. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Аванесов М.Ю., Комиссаров С.А., Сорокин К.Н. Сети, информация и знания – основные драйверы четвертой индустриальной революции (industrie 4.0) // Информация и космос. 2016. № 1. С. 14–25.

19. **Young-Ji Byon, Cortes C.E., Young-Seon Jeong, Martinez F.J., Munizaga M.A., Zuniga M.** Bunching and headway adherence approach to public transport with GPS // ICDM 2012: Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects. Pp. 77–91.

20. **Aftab Ahmed Chandio, Nikos Tziritas, Fan Zhang, Ling Yin, Cheng-Zhong Xu.** Towards adaptable and tunable cloud-based map-matching strategy for GPS trajectories // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2016. Vol. 17(12). Pp. 1305–1319.

21. **Dias D., Tchepel O.** Modelling of human exposure to air pollution in the urban environment: a GPS-based approach // Environ. Sci. Pollut. Res. 2014. No. 21. Pp. 3558–3571.

22. **Shoval N.** Monitoring and managing visitors flows in destinations using aggregate GPS data

// Information and communication technologies in tourism. Vienna, New York: Springer, 2010. Pp 171–184.

23. **Ayalew Belay Habtie, Ajith Abraham, Dida Midekso.** Artificial Neural Network Based Real-Time Urban Road Traffic State Estimation Framework // Computational Intelligence in Wireless Sensor Networks. Pp. 73–97.

24. **Guoyang Qin, Tienan Li, Bin Yu, Yunpeng Wang, Zhenhua Huang, Jian Sun.** Mining factors affecting taxi drivers' incomes using GPS trajectories // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2017. Vol. 79. Pp. 103–118.

25. **Banister D.** The sustainable mobility paradigm // Transport Policy. 2008. Vol. 15(2). Pp. 73–80.

26. **Garau C.** From territory to smartphone: Smart fruition of cultural heritage for dynamic tourism development // Planning Practice and Research. 2014. Vol. 29(3). Pp. 238–255.

27. **Garau C.** Smart paths for advanced management of cultural heritage // Regional Studies, Regional Science. 2014. Vol. 1(1). Pp. 286–293.

28. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О разработке показателей анализа оценки транспортной составляющей в структуре городского квартала // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 4 (52). С. 55–69.

29. **Benvenuti F., Diamantini C., Potena D., Storti E.** An ontology-based framework to support performance monitoring in public transport systems // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2017. Vol. 81. Pp. 188–208.

30. **Briand A.-S., Côme E., Trépanier M., Oukhellou L.** Analyzing 2018-to-2018 changes in public transport passenger behaviour using smart card data // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2017. Vol. 79. Pp. 274–289.

31. **Bibri S.E.** A foundational framework for smart sustainable city development: Theoretical, disciplinary, and discursive dimensions and their synergies // Sustainable Cities and Society. 2018. Vol. 38. Pp. 758–794.

Статья поступила в редакцию 07.02.2018.

REFERENCES

1. **Asaul A.N., Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Avanesov M.Yu.** Conceptual approaches to the construction of an intelligent multimodal transport system of the Russian Federation. *Information and Space*, 2016, No. 3, Pp. 8–17. (rus)

2. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Method of constructing the path of subjective preferential follow-up. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University Journal*, 2016, Vol. 4, Pp. 31–37. (rus)

3. **Ashim Kumar Debnath, Hoong Chor Chin, Md. Mazharu Haque, Belinda Yuen.** A methodological framework for benchmarking smart transport cities. *Cities*, 2014, Vol. 37, Pp. 47–56.

4. **Seliverstov Ya.A.** On the method of analyzing the structure of a mixed traffic flow on a city street network. *Izvestiya St. Petersburg University of Communications*, 2015, No. 3 (44), Pp. 104–111. (rus)

5. **Paefgen J., Staake T., Thiesse F.** Evaluation and aggregation of pay-as-you-drive insurance rate factors: a classification analysis approach. *Decis Support Syst.*, 2013, No. 56, Pp. 192–201.
6. **Ivanov A.Yu., Komashinskiy V.I., Malygin I.G.** The concept of building a single information space of an intelligent multimodal transport system. *Transport of the Russian Federation*, 2016, Vol. 6 (67), Pp. 24–28. (rus)
7. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** About a method of an estimation of efficiency of the organization of process of traffic of a megacity. *Vestnik transporta Povolzhya [Bulletin of Volga transport]*, 2015, No. 2 (50), Pp. 91–96. (rus)
8. **Malygin I.G., Silnikov M.V.** Intelligent transport security systems. *Problems of risk management in the technosphere*, 2014, Vol. 1 (29), Pp. 1–13. (rus)
9. **Marco Dozza, Nieves Paceda González.** Recognising safety critical events: Can automatic video processing improve naturalistic data analyses? *Accident Analysis & Prevention*, Nov. 2013, Vol. 60, Pp. 298–304.
10. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** Use of GATLOSAMI to prevent cause of traffic accidents and adverse social accidents in Smart City. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2016, No. 1 (236), Pp. 65–81. (rus) DOI: 10.5862/JCSTCS.236.7
11. **Lotfi Abdi, Faten Ben Abdallah, Aref Meddeb.** In-vehicle augmented reality traffic information system: A new type of communication between driver and vehicle. *Procedia Computer Science*, 2015, No. 73, Pp. 242–249.
12. **Feinerand S., MacIntyre B., Hollerer T., Webster A.** A touring machine: prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. *Personal Technologies*, 1997, Vol. 1(4), Pp. 208–217.
13. **Ibai Laca, Ignacio (Icaki) Olabarrieta, Manuel Vélez, Javier Del Ser.** On the imputation of missing data for road traffic forecasting: New insights and novel techniques. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2018, Vol. 90, Pp. 18–33.
14. **Hazelton M.L.** Statistical inference for time varying origin–destination matrices. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 2008, Vol. 42, Iss. 6, Pp. 542–552.
15. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** An overview of the indicators of the transport security of the megalopolis. *Bulletin of Civil Engineers*, 2015, No. 5 (52), Pp. 237–247. (rus)
16. **Andrea Souza Santos, Suzana Kahn Ribeiro** The role of transport indicators to the improvement of local governance in Rio de Janeiro City: A contribution for the debate on sustainable future. *Case Studies on Transport Policy*, 2015, Vol. 3, Iss. 4, Pp. 415–420.
17. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** The formal development of patterns of daily travel activity chains of the urban population. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2015, No. 4 (224), Pp. 91–104. (rus) DOI: 10.5862/JCSTCS.224.9
18. **Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Avanesov M.Yu., Komissarov S.A., Sorokin K.N.** Networks, information and knowledge are the main drivers of the fourth industrial revolution (industrie 4.0). *Information and Space*, 2016, No. 1, Pp. 14–25. (rus)
19. **Young-Ji Byon, Cortes C.E., Young-Seon Jeong, Martinez F.J., Munizaga M.A., Zuniga M.** Bunching and headway adherence approach to public transport with GPS. *ICDM 2012: Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects*, Pp. 77–91.
20. **Aftab Ahmed Chandio, Nikos Tziritas, Fan Zhang, Ling Yin, Cheng-Zhong Xu.** Towards adaptable and tunable cloud-based map-matching strategy for GPS trajectories. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2016, Vol. 17(12), Pp. 1305–1319.
21. **Dias D., Tchepel O.** Modelling of human exposure to air pollution in the urban environment: a GPS-based approach. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2014, No. 21, Pp. 3558–3571.
22. **Shoval N.** Monitoring and managing visitors flows in destinations using aggregate GPS data. *Information and communication technologies in tourism*, Springer, Vienna, New York, 2010, Pp 171–184.
23. **Ayalew Belay Habtie, Ajith Abraham, Dida Midekso.** Artificial Neural Network Based Real-Time Urban Road Traffic State Estimation Framework. *Computational Intelligence in Wireless Sensor Networks*, Pp. 73–97.
24. **Guoyang Qin, Tienan Li, Bin Yu, Yunpeng Wang, Zhenhua Huang, Jian Sun.** Mining factors affecting taxi drivers' incomes using GPS trajectories. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2017, Vol. 79, Pp. 103–118.
25. **Banister D.** The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 2008, Vol. 15(2), Pp. 73–80.
26. **Garau C.** From territory to smartphone: Smart fruition of cultural heritage for dynamic tourism development. *Planning Practice and Research*, 2014, Vol. 29(3), Pp. 238–255.
27. **Garau C.** Smart paths for advanced management of cultural heritage. *Regional Studies, Regional Science*, 2014, Vol. 1(1), Pp. 286–293.
28. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** On

the development of indicators of the analysis of the assessment of the transport component in the structure of the urban quarter. *Vestnik transporta Povolzhya* [*Bulletin of Volga Transport*], 2015, No. 4 (52), Pp. 55–69. (rus)

29. **Benvenuti F., Diamantini C., Potena D., Storti E.** An ontology-based framework to support performance monitoring in public transport systems. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2017, Vol. 81, Pp. 188–208.

30. **Briand A.-S., Côme E., Trépanier M., Oukhellou L.** Analyzing 2018-to-2018 changes in public transport passenger behaviour using smart card data. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2017, Vol. 79, Pp. 274–289.

31. **Bibri S.E.** A foundational framework for smart sustainable city development: Theoretical, disciplinary, and discursive dimensions and their synergies. *Sustainable Cities and Society*, 2018, Vol. 38, Pp. 758–794.

Received 07.02.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

СЕЛИВЕРСТОВ Ярослав Александрович
SELIVERSTOV Yaroslav A.
E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

ГЕРГЕЛЬ Глеб Юрьевич
GERGEL Gleb Yu.
E-mail: Glebgergel@yandex.ru

СЕЛИВЕРСТОВ Святослав Александрович
SELIVERSTOV Sviatoslav A.
E-mail: amuanator@rambler.ru

НИКИТИН Кирилл Вячеславович
NIKITIN Kirill V.
E-mail: exciter@mail.ru

DOI: 10.18721/JCSTCS.111106

УДК 681.51

УПРАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯМИ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РОБОТА С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНОГО ТРЕНИЯ

Т.А. Байдина, С.Ф. Бурдаков

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

Рассмотрена задача позиционно-силового управления движением системы «робот — инструмент — деталь», характерным для операций механообработки. Инструмент установлен в упругом подвесе, обеспечивающем силовое ощущение робота. Робот, в соответствии с технологической задачей, движется с некоторой скоростью вдоль поверхности с заданным прижатием к ней. В этом случае между инструментом и деталью возникают силы трения, нелинейный характер которых, в условиях упругого подвеса инструмента, может стать причиной возникновения в системе «робот — инструмент — деталь» на малых (ползучих) скоростях движения робота вдоль поверхности фрикционных автоколебаний. В результате появляется неравномерность движения с кратковременными остановками инструмента. В статье методами математического и компьютерного моделирования показано, при каких условиях возникает этот эффект и как при этом с помощью вибрационного (импульсного) сглаживания подавить фрикционные автоколебания. Показано как, оставаясь в рамках штатной системы управления, сделать этот процесс адаптивным с помощью логического переключающего устройства. Намечены перспективы использования для этих целей искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: система «робот — инструмент — деталь»; силовое ощущение; позиционно-силовое управление; контактное взаимодействие; нелинейное трение; Штрибек-эффект; ползучая скорость; автоколебания; импульсное сглаживание; адаптация.

Ссылка при цитировании: Байдина Т.А., Бурдаков С.Ф. Управление автоколебаниями при контактном взаимодействии робота с обрабатываемой поверхностью в условиях нелинейного трения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 1. С. 65–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.111106

CONTROL OF SELF-OSCILLATIONS IN CONTACT INTERACTION OF A ROBOT WITH A TREATED SURFACE UNDER NONLINEAR FRICTION

T.A. Baidina, S.F. Burdakov

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

The article considers the problem of position-force control of the «robot – tool – detail» system movement, which is typical for machining operations. The tool is installed in elastic suspension, which provides force sensing of the robot. The robot, in accordance with the technological task, moves at a certain speed along the surface with a predetermined pressure to it. The non-linear nature of friction under elastic suspension of the tool and a small (creeping) speed of movement of the robot along the surface can cause frictional self-oscillations in the system. This can lead to a non-uniform motion with short-term stops of the tool. In this article, we have investigated the conditions under which this effect occurs by use of mathematical and computer simulation methods. Furthermore, it is shown how the frictional self-oscillations can be suppressed by another nonlinear effect, vibrational (pulse) smoothing. The way of making this process adaptive within the framework of a regular control system by use of a logical switching device is proposed. In the future it is planned to use artificial neural networks for these purposes.

Keywords: system «robot – tool – detail»; force sensing; position-force control; contact interaction; nonlinear friction; Stribeck effect; creeping speed; self-oscillations; pulse smoothing; adaptation.

Citation: Baidina T.A., Burdakov S.F. Control of self-oscillations in contact interaction of a robot with a treated surface under nonlinear friction. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 1, Pp. 65–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.11106

Введение

Задачи управления контактным взаимодействием роботов с обрабатываемой поверхностью актуальны для автоматизации процессов механообработки, шлифовки турбинных лопаток, лопастей гребных валов и т. п. [1, 2]. До настоящего времени в силу ряда причин некоторые процессы даже при массовом производстве все еще выполняются вручную [3]. Одна из причин связана с тем, что в зависимости от технологических требований приходится рассматривать очень широкий спектр режимов взаимодействия [4]. При этом стремление к повышению точности процессов часто приводит к нарушению их стабильности [4, 5]. Речь идет о возникновении в упругой системе «робот – инструмент – деталь» нежелательных резонансных явлений, автоколебаний, высокочастотных вибраций, которые в свою очередь приводят к нарушению технологических требований обработки деталей, а также к быстрому износу и поломкам инструмента [5, 6]. Все это неизбежно обуславливает необходимость введения в штатную систему управления робота различных контуров адаптации и подсистем искусственного интеллекта [7, 8].

В настоящей статье основной акцент делается на подавлении фрикционных ав-

токолебаний, возникающих на ползучих скоростях движения робота вдоль обрабатываемой поверхности с заданным прижатием к ней.

Постановка задачи

Предполагается, что робот имеет три взаимно перпендикулярные степени подвижности. На роботе в упругом подвесе установлен рабочий инструмент. Упругий подвес обеспечивает силовое очувствление робота по трем осям. Деталь закреплена на подвижном основании. Ориентирующие степени подвижности основания позволяют обеспечить совпадение инструментальной оси и главной нормали к поверхности обрабатываемой детали. При таких предположениях динамическая взаимосвязь степеней подвижности робота проявляется только через силы трения в режиме контактного взаимодействия с деталью. При этом штатная система управления робота должна обеспечивать по вертикальной координате требуемое прижатие инструмента к поверхности детали, а по горизонтальным координатам – требуемое движение вдоль поверхности. При движении вдоль поверхности между инструментом и поверхностью детали возникают силы трения, препятствующие движению, характер которых

зависит от свойств пар трения, относительных скоростей горизонтального движения и от силы прижатия инструмента к поверхности детали.

Экспериментально установлено [9], что в подобных ситуациях при малых (ползучих) скоростях движения инструмента вдоль поверхности могут возникнуть фрикционные автоколебания, представляющие собой периодическое движение с кратковременными остановками инструмента. В то же время, при тех же условиях, но при относительно больших скоростях движения автоколебания не возникают.

Задача данной статьи состоит в том, чтобы выбрать адекватную модель трения, позволяющую правильно описать наблюдаемые на практике фрикционные автоколебания и обеспечить их подавление с помощью контура адаптации, дополняющего штатную систему управления [9, 10].

На рис. 1 приведена упрощенная расчетная схема контактного взаимодействия робота с поверхностью неопределенного профиля.

Учитывается вертикальная степень подвижности робота y и одна из горизонтальных степеней подвижности робота x . Такая расчетная схема позволяет правильно учесть характер взаимодействия робота

с поверхностью обрабатываемой детали. Штатная система управления в этом случае имеет два канала: позиционно-силовой по вертикальной координате, обеспечивающий требуемое прижатие F_y^d инструмента к поверхности детали, и скоростной канал по горизонтальной координате, обеспечивающий заданную скорость движения V_x^d инструмента вдоль поверхности [11]. Считается, что робот оснащен датчиком положения по координате y и датчиком скорости по координате x . Соответствующие координаты инструмента обозначим y_s и x_s . Кроме того, при управлении роботом используется информация с датчиков силы, которая характеризует состояние упругого подвеса инструмента $R_x = K_x(x - x_s)$, $R_y = K_y(y - y_s^*)$, где K_x , K_y – жесткости упругого подвеса инструмента по координатам x и y .

Будем считать, что контакт инструмента с поверхностью обрабатываемой детали установлен, и сила прижатия достигла требуемого значения F_y^d . В этот момент времени начинается движение робота по горизонтальной координате с поддержанием требуемого прижатия F_y^d . Математическая модель такого движения со штатной системой управления имеет следующий вид [12, 13]:

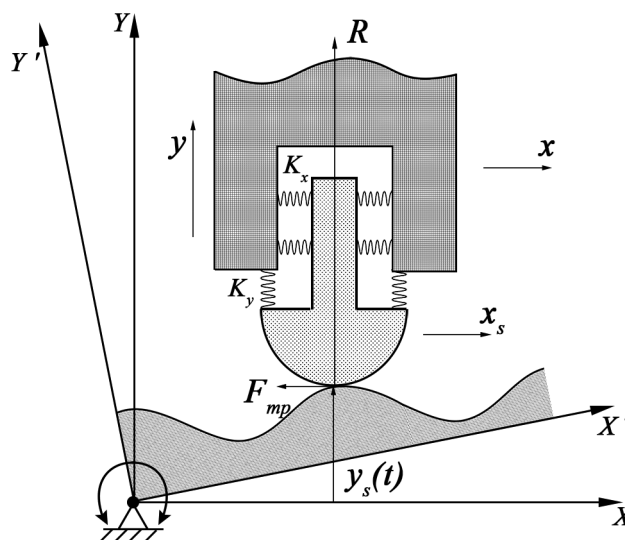


Рис. 1. Расчетная схема системы «робот – инструмент – деталь»

Fig. 1. The calculation scheme of the «robot-tool-detail» system

$$\begin{aligned} M_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + K_y (y - y_s^*) &= F_y - M_y g, \\ M_x \ddot{x} + b_x \dot{x} + K_x (x - x_s) &= F_x, \\ m_x \ddot{x}_s + b_{xs} \dot{x}_s + K_x (x_s - x) &= -F_f. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F_y &= \left(k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \frac{N}{1 + Np^{-1}} \right) (\tilde{y}^d - y), \\ \tilde{y}^d &= \left(\theta_p + \theta_i \frac{1}{p} + \theta_d \frac{N}{1 + Np^{-1}} \right) (F_y^d - R_y), \\ F_x &= \left(\xi_p + \xi_i \frac{1}{p} + \xi_d \frac{N}{1 + Np^{-1}} \right) (V_x^d - \dot{x}). \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (1) дают описание объекта управления, а уравнения (2) – штатного закона управления, состоящего из двух ПИД-регуляторов по вертикальной координате y и силе прижатия R_y и одного ПИД-регулятора по горизонтальной скорости $\dot{x}$. В математической модели (1), (2) введены следующие обозначения: M_x , M_y – приведенные массы руки робота; m_x – приведенная масса инструмента; K_x , K_y – жесткости упругого подвеса инструмента; b_x , b_y , b_{xs} – коэффициенты вязкого трения; F_x , F_y – силы, развиваемые двигателями робота; F_f – сила трения в области контакта инструмента с поверхностью.

Модели трения и фрикционные автоколебания

Математическая модель (1), (2) описывает режимы движения робота без потери контакта между инструментом и поверхностью детали. При этом взаимовлияние по трем независимым координатам x , y , x_s

происходит только через силу трения F_f . Покажем, что при адекватном выборе модели трения расчетная схема (см. рис. 1) и математическая модель (1), (2) позволяют получить автоколебательные процессы, наблюдаемые на практике.

Рассмотрим модель трения, учитывающую вязкое трение, сухое (кулоново) трение, и трение с учетом Штрибек-эффекта:

$$F_f = \left(a_0 + a_1 \exp \left(- \left(\frac{V_{xs}}{V_{x0}} \right)^2 \right) \right) \text{sign } V_{xs} + a_2 V_{xs}, \quad (3)$$

где $a_0 + a_1$ – уровень максимальной силы трения покоя; $a_0 = \mu R$ – величина силы трения при движении, зависящая от вертикальной реакции поверхности R и коэффициента трения μ ; a_2 – коэффициент вязкого трения; V_{x0} – параметр Штрибек-эффекта (рис. 2) [11, 14].

Рассмотрим возможные варианты модели трения (3): $a_0 = 0$, $a_1 = 0$ – вязкое трение; $a_1 = 0$, $a_2 = 0$ – сухое (кулоново) трение; $a_2 = 0$ – сухое трение с учетом Штрибек-эффекта. Из модели (3) видно, что при вязком трении $F_f = a_2 V_{xs}$ уравнения по координатам x и y динамически не связаны. При сухом трении и трении со Штрибек-эффектом движение по координате y через нормальную реакцию поверхности R влияет на F_f и далее на движение по координате x . Обратное влияние при этом отсутствует. С помощью компьютерного моделирования рассмотрим более подробно варианты с сухим трением и трением со Штрибек-эффектом. Примем следующие значения параметров: $M_x = M_y = 2$ кг,

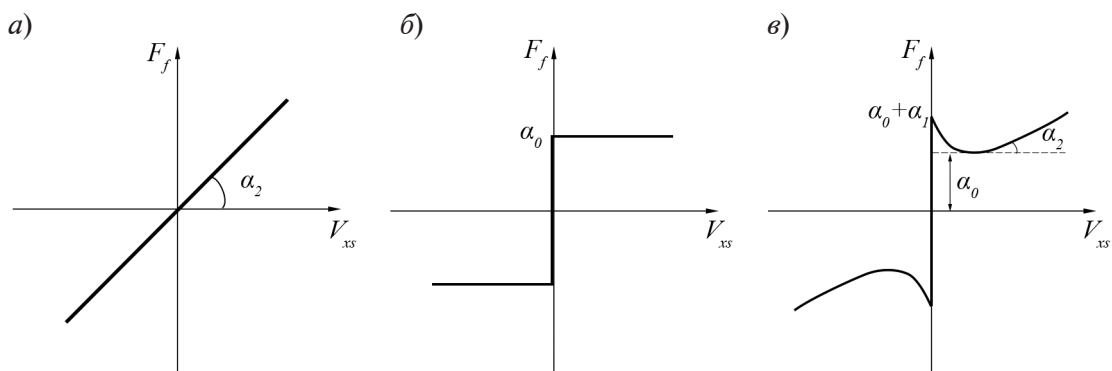


Рис. 2. Модели трения в зоне контакта инструмента и детали

Fig. 2. Model of friction in the contact area of the tool and the part

$m_x = 0,5$ кг, $K_x = 3000$ Н/м, $K_y = 4000$ Н/м, $b_x = b_y = 25$ Н·см, $F_y^d = 40$ Н, $a_0 + a_1 = 5$ Н, $\mu = 0,1$, $V_{x0} = V_x^d = 0,01$ м/с. При таких значениях параметров собственные частоты объекта управления по координатам x и y определяются следующим образом: $\omega_x \cong (K_x/M_x + K_x/m_x)^{1/2} = 86,6$ рад/с (13,8 Гц), $\omega_y \cong (K_y/M_y)^{1/2} = 44,7$ рад/с (7,1 Гц).

Настройка штатных ПИД-регуляторов (2) для всех вариантов моделей трения была одна и та же. Она осуществлялась стандар-

тно с помощью пакета Matlab для варианта с вязким трением по прямым показателям качества переходных процессов.

На рис. 3 приведены графики процессов движения робота по горизонтальной координате для разных моделей трения. Переходные процессы по вертикальной координате с выходом на требуемое прижатие F_y^d завершаются за время чуть менее 1 с. С этого момента начинается движение по горизонтальной координате. Видно, что при вязком трении (рис. 3 а) движение быстро переходит в установившийся режим.

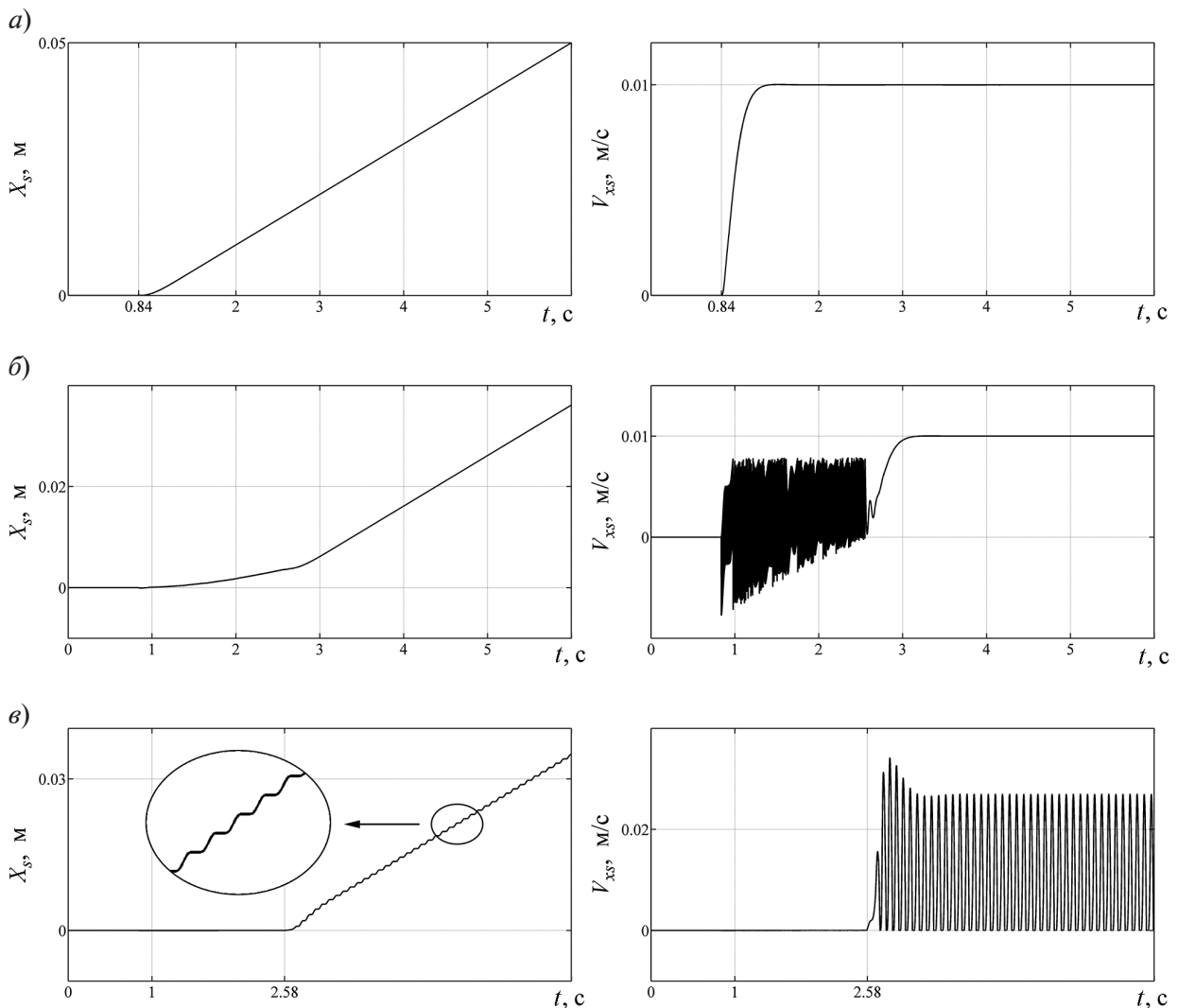


Рис. 3. Процессы в системе на ползучей скорости $V_x^d = 0,01$ м/с:
а – при вязком трении; б – при сухом трении; в – при трении со Штрибек-эффектом

Fig. 3. Processes in the system at creeping speed $V_x^d = 0.01$ m/s:
a – with viscous friction; б – with dry friction; в – with friction with Stribeck effect

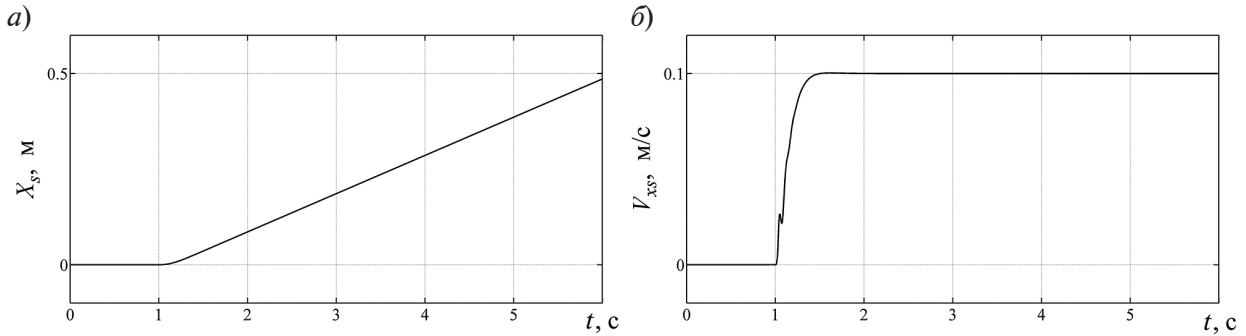


Рис. 4. Процессы в системе при трении со Штрибек-эффектом на скорости

Fig. 4. Processes in the system in friction with the Stribeck effect at speed

При кулоновом трении (рис. 3 б) движение инструмента начинается примерно через 1,3 с и после переходного процесса скорость V_{xs} выходит на требуемый уровень 0,01 м/с. При модели трения со Штрибек-эффектом примерно через 2,5 с возникают устойчивые автоколебания с частотой $\omega_A \cong 12$ Гц и амплитудой по скорости $A = 0,012$ м/с.

Автоколебания проявляются в нарушении равномерности движения по координате инструмента x_s . Инструмент в этом случае движется с кратковременными остановками так, как это наблюдается на практике (рис. 3 в).

На рис. 4 приведены графики процессов движения робота по горизонтальной координате для модели трения со Штрибек-эффектом при относительно большой скорости $V_x^d = 0,1$ м/с. Видно, что в этом случае автоколебания не воз-

никают, и после непродолжительного переходного процесса скорость V_{xs} выходит на установившийся уровень $V_x^d = 0,1$ м/с. Эта ситуация тоже соответствует наблюдаемой на практике.

Импульсное сглаживание и адаптация

Эффективным способом подавления автоколебаний на малых (ползучих) скоростях движения может стать эффект вибрационного (импульсного) сглаживания нелинейного трения, которое вместе с упругой податливостью по координате x , является главной причиной возникновения автоколебаний в системе «робот – инструмент – деталь» (1), (2) [10, 14]. Для подавления автоколебаний предлагается вводить в контур горизонтального движения (рис. 5) дополнительное внешнее импульсное воздействие

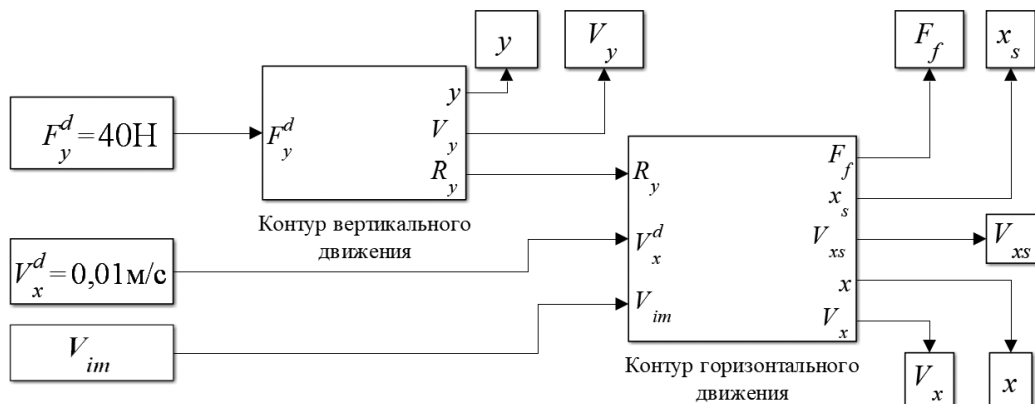


Рис. 5. Модель системы (1), (2) в Matlab (Simulink)

Fig. 5. The system model (1), (2) in Matlab (Simulink)

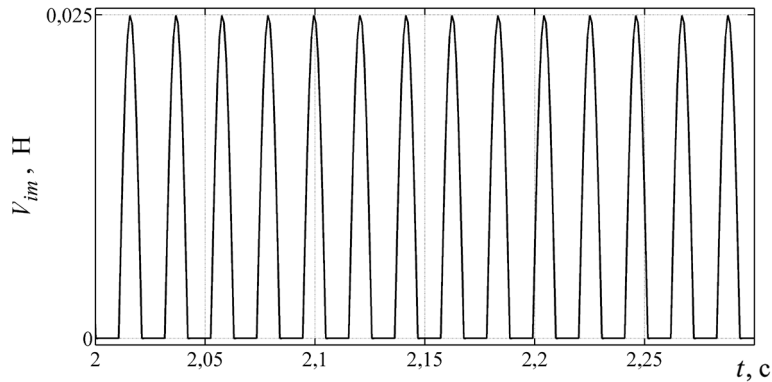


Рис. 6. Внешнее импульсное воздействие

Fig. 6. External Impulse

$$V_{im}(t) = \begin{cases} B \sin(\omega_B t), & V_{im} > 0 \\ 0, & V_{im} \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

амплитуду B и частоту ω_B которого можно варьировать при условии $\omega_B \gg \omega_A$ (рис. 6).

На рис. 7 приведены графики процессов с импульсным сглаживанием при $B = 0,025$ м/с, $\omega_B = 300$ рад/с. Видно, что в этом случае на ползучей скорости автоколебания не возникают, и после небольшого переходного процесса скорость инструмента устанавливается на некотором уровне, превышающем V_x^d . Это превышение обусловлено ненулевым средним значением импульсного воздействия (4). Поэтому при варьировании амплитуды B следует ориентироваться на минимальное эффективное значение.

Таким образом, принципиальная возможность подавления автоколебаний в системе «робот – инструмент – деталь» с по-

мощью внешнего импульсного воздействия установлена. Чтобы этот процесс сделать адаптивным, необходимо online определять момент времени включения (выключения) импульсного воздействия, выбирать его амплитуду B и частоту ω_B , а также поддерживать установившуюся скорость V_{xs} на требуемом уровне V_x^d .

Решить эту задачу удалось с помощью введения в штатную систему управления дополнительного логического переключающего устройства (ЛПУ), предназначенного для включения (выключения) внешнего импульсного воздействия [15]. Для его формирования проанализируем процессы в системе «робот – инструмент – деталь» непосредственно перед возникновением автоколебаний. На рис. 8 приведены процессы с датчиков обратных связей по горизонтальной координате x . Видно, что характер процессов позволяет с помощью

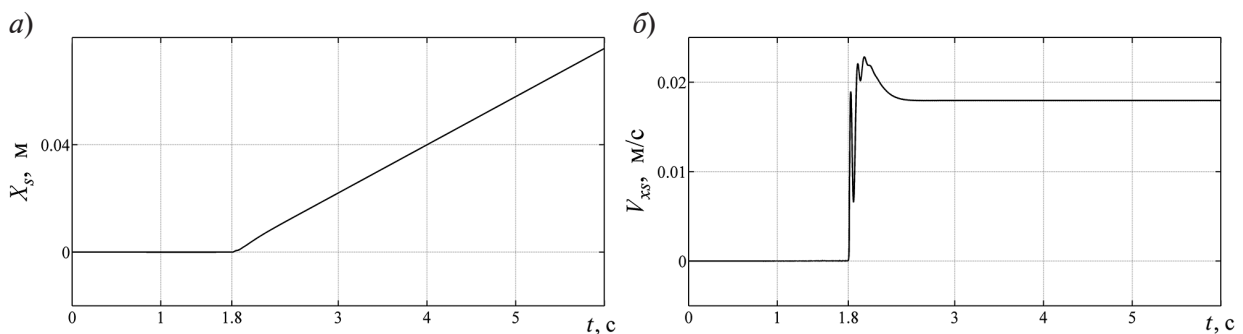


Рис. 7. Процессы в системе при трении со Штрибек-эффектом на ползучей скорости в условиях импульсного сглаживания

Fig. 7. Processes in the system in friction with the Stribeck effect at creeping speed under conditions of pulsed smoothing

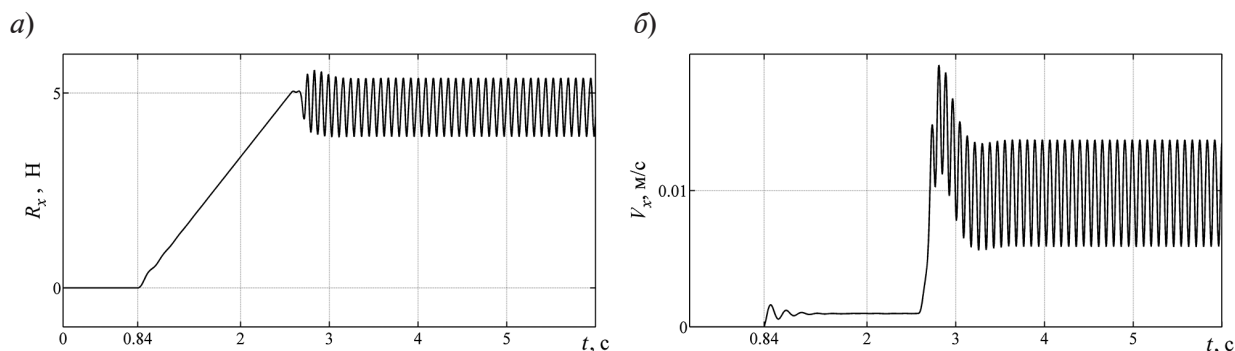


Рис. 8. Процессы с датчиков обратных связей по горизонтальной координате

Fig. 8. Processes with feedback sensors on the horizontal coordinate

фильтра верхних частот однозначно определять момент времени возникновения автоколебаний. Амплитуда B и частота ω_B дополнительного импульсного воздействия корректируются путем обучения ЛПУ на нескольких пробных движениях системы «робот — инструмент — деталь». В условиях массового производства это вполне допустимо. При выбранной амплитуде B можно скорректировать установившуюся скорость V_{xs} до значений, при которых автоколебания не возникают. Необходимость обучения ЛПУ связана с тем, что в реальных условиях заранее установить все параметры характеристики трения не представляется

возможным в силу многих причин, в том числе и причин случайного характера [9].

Заключение

В заключении заметим, что любая модель трения дает лишь приближенное представление о реальном трении в системе, поэтому, наряду с адаптацией с помощью ЛПУ перспективным направлением дальнейших исследований является переход к искусственным нейронным сетям, позволяющим использовать обучение не только на пробных движениях до перехода к массовому производству, но и online в процессе массового производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассказчиков Н.Г. Управление промышленными роботами для абразивной зачистки с использованием силомоментной адаптации // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6 // URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16772>
2. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010. 192 с.
3. Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И., Шпилёв А.М., Бурков А.А. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием. Владивосток: Дальнаука, 2000. 195 с.
4. Крагельский И.В., Гитис Н.В. Фрикционные автоколебания. М.: Наука, 1987. 181 с.
5. Гайворонский Е.Г., Кеглин Б.Г. Особенности фрикционных автоколебаний в непрерывной системе // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 11. С. 3–9.
6. Бурдаков С.Ф., Байдина Т.А., Шагниев О.Б. Управление вибрационным состоянием робота при силовом взаимодействии с шероховатой поверхностью неопределенного профиля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2016. № 4. С. 43–52. DOI: 10.5862/JCSTCS.252.4
7. Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Биленко С.В. Адаптивное управление технологическими системами механообработки на основе искусственного интеллекта // Технология машиностроения. 2004. № 6. С. 46–48.
8. Lischinsky P., Canudas-de-Wit C., Morel G. Friction compensation for an industrial hydraulic robot // IEEE Control System. 1999. No. 2. Pp. 25–32.
9. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.
10. Первозванский А.А. Трение — сила знакомая, но таинственная // Соросовский образова-

тельный журнал. 1998. № 2. С. 129–134.

11. Canudas-de-Wit C., Olsson H., Estrum K.J., Lischinsky P. A new model for control of system with friction // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1995. Vol. 40. No. 3. Pp. 419–425.

12. Бурдаков С.Ф., Шагниев О.Б. Модели механики в задаче управления силовым взаимодействием робота с поверхностью неопределенного профиля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 4. С. 68–79. DOI: 10.5862/JCSTCS.224.7

13. Байдина Т.А., Шагниев О.Б., Бурдаков С.Ф. Контактное взаимодействие робота с по-

верхностью неопределенного профиля при активном креплении силового сенсора // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с международным участием. Ин-т прикладной математики и механики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 44–47.

14. Ле Су Ань. Динамика систем с кулоновым трением. СПб.: Нестор, 1999. 299 с.

15. Байдина Т.А., Бурдаков С.Ф. Управление роботом при контактных операциях с поверхностью неопределенного профиля в условиях трения // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с международным участием. Ин-т прикладной математики и механики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 100–103.

Статья поступила в редакцию 06.02.2018.

REFERENCES

1. Rasskazchikov N.G. Upravleniye promyshlennymi robotami dlya abrazivnoy zachistki s ispolzovaniyem silomomentnoy adaptatsii [Control of industrial robots for abrasive cleaning using force-moment adaptation]. *Sovremennyye problemi nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2014, No. 6. (rus) Available: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16772>

2. Yegorov I.N. Pozitsionno-silovoye upravleniye robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami [Position-power control of robotic and mechatronic devices]. Vladimir: Vladimirovskiy gos. universitet Publ., 2010, 192 p. (rus)

3. Kabaldin Yu.G., Oleynikov A.I., Shpilev A.M., Burkov A.A. Matematicheskoye modelirovaniye samoorganizuyushchikhsya protsessov v tekhnologicheskikh sistemakh obrabotki rezaniyem [Mathematical modeling of self-organizing processes in technological systems of processing by cutting]. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2000, 195 p. (rus)

4. Kragelskiy I.V., Gitis N.V. Friksionnyye vtokolebaniya [Frictional self-oscillations]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 181 p. (rus)

5. Gayvoronskiy Ye.G., Keglins B.G. The features of frictional self-oscillations in a continuous system. *Friction & Lubrication in Machines and Mechanisms*, 2010, No. 11, Pp. 3–9. (rus)

6. Burdakov S.F., Baydina T.A., Shagneyev O.B. Control of vibrational state of a robot interacting with a rough free-formed surface. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2016, No. 4, Pp. 43–52. (rus) DOI: 10.5862/JCSTCS.252.4

7. Kabaldin Yu.G., Seryy S.V., Bilenko S.V. Adaptivnoye upravleniye tekhnologicheskimi sistemami mekhanooobrabotki na osnove iskusstvennogo intellekta [Adaptive control of technological systems of machining based on artificial intelligence]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* [Technology of Mechanical Engineering], 2004,

No. 6, Pp. 46–48. (rus)

8. Lischinsky P., Canudas-de-Wit C., Morel G. Friction compensation for an industrial hydraulic robot. *IEEE Control System*, 1999, No. 2, Pp. 25–32.

9. Popov V.L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletreseniy [Mechanics of contact interaction and physics of friction. From nanotribology to earthquake dynamics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2013, 352 p. (rus)

10. Pervozvanskiy A.A. Treniye — sila znakomaya, no tainstvennaya [Friction is a familiar force, but mysterious]. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal* [Soros Educational Journal], 1998, No. 2, Pp. 129–134. (rus)

11. Canudas-de-Wit C., Olsson H., Estrum K.J., Lischinsky P. A new model for control of system with friction. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, Vol. 40, No. 3, Pp. 419–425.

12. Burdakov S.F., Shagneyev O.B. Modeli mekhaniki v zadache upravleniya silovym vzaimodeystviyem robota s poverkhnostyu neopredelennogo profilya [Mechanics models in the control problem of the force interaction between a robot and a free-formed surface]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2015, No. 4, Pp. 68–79. (rus) DOI: 10.5862/JCSTCS.224.7

13. Baydina T.A., Shagneyev O.B., Burdakov S.F. Kontaktnoye vzaimodeystviye robota s poverkhnostyu neopredelennogo profilya pri aktivnom krepnenii silovogo sensora [Contact interaction of a robot with a surface of an undefined profile with an active fastening of a power sensor]. *Week of Science SPbPU: materials of a scientific conference with international participation. Institute of Applied Mathematics and Mechanics*. St. Petersburg: Politechn. University Publ., 2016, Pp. 44–47. (rus)

14. Le Su An. Dinamika sistem s kulonovym

treniyem [*Dynamics of systems with Coulomb friction*]. St. Petersburg: Nestor Publ., 1999, 299 p. (rus)

15. **Baydina T.A., Burdakov S.F.** Upravleniye robotom pri kontaknykh operatsiyakh s poverkhnostyu neopredelennogo profilya v usloviyakh treniya [Robot control in contact operations with

a surface of an undefined profile under friction conditions]. *Week of Science SPbPU: materials of a scientific conference with international participation. Institute of Applied Mathematics and Mechanics*. St. Petersburg: Politechn. University Publ., 2017, Pp. 100–103. (rus)

Received 06.02.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

БАЙДИНА Татьяна Александровна

BAIDINA Tatyana A.

E-mail: baydinatanya2401@gmail.com

БУРДАКОВ Сергей Федорович

BURDAKOV Sergey F.

E-mail: burdakov.s@yandex.ru



Federated Conference on Computer Science and Information Systems

9-12 September, 2018
Poznań, Poland

Call for Event:

The FedCSIS multi-conference consists of a significant number of antecedent Events. However, the Call for Events is open to all areas of computer science and information systems and new proposals for associated Events (conferences, symposia, workshops, special sessions, project dissemination events, etc.) are cordially invited until **November 14, 2017**.

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

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



POLSKIE TOWARZYSTWO INFORMATYCZNE
DODATKOWO

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

POZnań*

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»
«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

Том 11, № 1, 2018

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

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

Редакция журнала

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

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Перевод на английский язык *А.С. Колгатина*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 29.03.2018. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,30. Уч.-изд. л. 9,30. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

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

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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

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

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

Периодичность выхода журнала — 4 номера в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

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

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

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

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

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

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

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

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

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

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

2.3. Рассмотрение материалов

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

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

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

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

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

Более подробную информацию можно получить:

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

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

или по e-mail: infocom@spbstu.ru