НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

НОЯБРЬ-ДЕКАБРЬ 2013 ВЫПУСК 6 (88) ISSN 2226-1494

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Инфракрасная томография горячего газа: математическая модель активно-пассивной диагностики — *Сизиков В.С.* — 1

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Исследование зависимости амплитуды выходного сигнала в схеме гомодинной демодуляции для фазового волоконно-оптического датчика — *Плотников М.Ю., Куликов А.В., Стригалев В.Е.* — 18

Исследование зависимости параметров анизотропных одномодовых волоконных световодов от диаметра намотки — *Аксарин С.М., Архипов С.В., Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалев В.Е.* — 22

Стабилизация фазовой характеристики сигнала фазового волоконно-оптического датчика в условиях изменения температуры — *Алейник А.С., Дейнека И.Г., Макаренко А.А., Мехреньгин М.В., Стригалев В.Е.* — 26

Влияние температурной нестабильности характеристик источника на показания волоконно-оптического гироскопа — *Шарков И.А., Рупасов А.В., Стригалев В.Е., Волковский С.А.* — 31

ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА

Статистический анализ геометрических размеров объектов, обладающих радиальной симметрией — *Самусев К.Б., Рыбин М.В., Лимонов М.Ф.* — 36

Методика сравнения алгоритмов стереозрения при восстановлении трехмерной формы лица человека — *Пономарев С.В.* — 40

Анализ особенностей иерархического представления изображений в современных системах компьютерного зрения — *Васильев В.Н., Гуров И.П., Потапов А.С.* — 45

Метод динамической обработки данных в спектральной оптической когерентной томографии с компенсацией влияния дисперсии — *Волынский М.А., Гуров И.П.* — 50

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Построение системы интервального оценивания для модели регуляции гормона тестостерона — *Ефимов Д.В., Кремлев А.С., Харьковская Т.А., Чеботарев С.Г.* — 56

Способ измерения фазы интерферометрического сигнала — *Мирошниченко Г.П., Дейнека И.Г., Погорелая Д.А., Шуклин Ф.А., Смоловик М.А.* — 61

Методика расчета нестационарных температур космического объекта, движущегося по эллиптической орбите — *Баёва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И.* — 67

МЕХАНИКА И МЕХАТРОНИКА

Моделирование погрешностей гиростабилизатора гравиметра на волоконно-оптических гироскопах — *Дзюба А.Н., Старосельцев Л.П.* — 73

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Средства типизации и прагматика языка моделирования ОРГ-Мастер — *Кудрявцев Д.В., Кознов Д.В., Григорьев Л.Ю.* — 79

Техника измерения температуры локального участка программируемых логических интегральных схем на базе метода Монте-Карло — *Кустарев П.В., Быковский С.В.* — 86

Принципы построения комбинированной топологии сети для перспективных бортовых вычислительных систем — *Книга Е.В., Жаринов И.О.* — 92

Разработка принципов функциональной организации группы полевых геофизических приборов нового поколения — *Денисов В.М., Радилов А.В.* — 98

Агентное взаимодействие в информационной системе предприятия с адаптацией механизмов работы и интерфейса пользователя — *Владимиров А.В.* — 105

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Влияние островковых металлических пленок на агрегацию и усиление молекулярного поглощения псевдоизоцианина — *Торопов Н.А., Вартанян Т.А.* — 112

Исследование и разработка люминесцентных нанокомпозитов для интегрально-оптических микрочипов — *Денисюк И.Ю., Бурункова Ю.Э., Собещук Н.О.* — 116

Прецизионное перемещение микро- и наночастиц под воздействием электронного пучка — *Денисюк А.И., Комиссаренко Ф.Э.* — 118

Оптические свойства PbSe квантовых точек, сформированных во фторофосфатном стекле — *Колобкова Е.В., Полякова А.В., Абдршин А.Н., Трофимов А.О., Никоноров Н.В., Асеев В.А.* — 123

Самоорганизация квантовых точек сульфида свинца разного размера — *Ушакова Е.В., Голубков В.В., Литвин А.П., Парфенов П.С., Баранов А.В.* — 127

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Локальная минимизация числа межслойных переходов в топологии печатного монтажа — *Лузин С.Ю., Попов С.И., Попов Ю.И.* — 133

Принцип формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации — *Парамонов П.П., Костишин М.О., Жаринов И.О.,Нечаев В.А., Сударчиков С.А.* — 136

ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Оценка влияния шероховатости поверхности на коррозионную стойкость изделий машиностроения — *Иванов А.Ю., Леонов Д.Б.* — 143

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Различение пользователей на основе их поведения в сети Интернет — *Юрасов Д.С., Зикратов И.А.* — 148

ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ

Национальная инновационная система: структура, роль финансовой составляющей — *Красноперова Т.Я.* — 152

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Совершенствование программ подготовки менеджеров по персоналу на основе анализа стилей обучения — *Карпова Е.А.* — 157

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Автоматизированный аппаратно-программный комплекс контроля протяженных источников излучения — *Горбунова Е.В., Коротаев В.В. Перетягин В.С.* — 162

Повышение эффективности обработки динамически сжимаемых текстур — *Перминов И.В.* — 164

SUMMARY — 166

Издание Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики

Publication of Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
В.О. Никифоров, доктор технических наук, профессор

EDITOR IN CHIEF
V. Nikiforov, Doctor of Technical Sciences, Professor

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
А.А. Бобцов, доктор технических наук, профессор
А.В. Бухановский, доктор технических наук
В.А. Валетов, доктор технических наук, профессор
Т.А. Вартанян, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
М.А. Ган, доктор технических наук
Ю.А. Гатчин, доктор технических наук, профессор
Н.Ф. Гусарова, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
А.В. Демин, доктор технических наук, профессор
Н.С. Кармановский, кандидат технических наук, доцент (заместитель главного редактора)
Ю.Л. Колесников, доктор физико-математических наук, профессор
С.А. Козлов, доктор физико-математических наук, профессор
А.Г. Коробейников, доктор технических наук, профессор
В.В. Курейчик, доктор технических наук, профессор
Л.С. Лисицына, доктор технических наук, доцент
В.Г. Мельников, кандидат технических наук, доцент
Ю.И. Нечаев, доктор технических наук, профессор
Н.В. Никоноров, доктор технических наук, профессор
А.А. Ожиганов, доктор технических наук, профессор
П.П. Парамонов, доктор технических наук, профессор
Е.Ю. Перлин, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
И.Г. Сидоркина, доктор технических наук, профессор
О.А. Степанов, доктор технических наук
В.Л. Ткалич, доктор технических наук, профессор
А.А. Шалыто, доктор технических наук, профессор
Ю.Г. Якушенков, доктор технических наук, профессор

Г.О. Артемова, ответственный секретарь
Н.Ф. Гусарова, редактор, верстка
Л.Н. Точилина, редактор
Н.Г. Лещикова, перевод
М.В. Герасимова, графика

ASSOCIATED EDITORS
A. Bobtsov, Doctor of Technical Sciences, Professor
A. Boukhanovsky, Doctor of Technical Sciences,
V. Valetov, Doctor of Technical Sciences, Professor
T. Vartanyan, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow
M. Gan, Doctor of Technical Sciences,
Yu. Gatchin, Doctor of Technical Sciences, Professor
N. Gusarova, Ph.D., Senior Research Fellow
A. Demin, Doctor of Technical Sciences, Professor
N. Karmanovsky, Ph.D., Associate professor (Deputy Editor)
Yu. Kolesnikov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
S. Kozlov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
A. Korobeinikov, Doctor of Technical Sciences, Professor
V. Kureichik, Doctor of Technical Sciences, Professor
L. Lisitsyna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
V. Melnikov, Ph.D., Associate Professor
Yu. Nechayev, Doctor of Technical Sciences, Professor
N. Nikonorov, Doctor of Technical Sciences, Professor
A. Ozhiganov, Doctor of Technical Sciences, Professor
P. Paramonov, Doctor of Technical Sciences, Professor
E. Perlin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow
I. Sidorkina, Doctor of Technical Sciences, Professor
O. Stepanov, Doctor of Technical Sciences,
V. Tkalich, Doctor of Technical Sciences, Professor
A. Shalyto, Doctor of Technical Sciences, Professor
Yu. Yakushenkov, Doctor of Technical Sciences, Professor

G. Artemova, executive secretary
N. Gusarova, editor, making-up
L. Tochilina, editor
N. Leshchikova, translation
M. Gerasimova, graphics

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, НИУ ИТМО, комн. 330
Телефон / факс (812) 233 45 51
http: //ntv.ifmo.ru
E-mail:karmanov@mail.ifmo.ru

Address: 197101, St. Petersburg, Kronverksky, 49, NRU ITMO, room 330
Phone / fax (812) 233 45 51
http: //ntv.ifmo.ru
E-mail:karmanov@mail.ifmo.ru

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

Редакция принимает к рассмотрению оригинальные (нигде ранее не опубликованные, за исключением материалов научных конференций) работы по тематике журнала, представляющие новые научные результаты, полученные лично авторами статьи. Публикуются также обзоры, характеризующие современное состояние актуальных направлений развития науки и техники, сообщения о научных конференциях, материалы научных дискуссий и рецензии на новые книги. Тематика журнала включает разделы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения по направлениям: оптика, оптические системы и технологии, оптическое материаловедение и нанотехнологии, информационные и компьютерные системы и технологии, методы и системы защиты информации, системный анализ, системы автоматического управления, мехатроника, системы автоматизированного проектирования, микроэлектроника, биомедицинские технологии. В качестве дополнительных разделов журнал также публикует работы по экономике и финансам.

Материал статьи должен быть изложен в соответствии со следующей структурой. В аннотации объемом 200─250 слов необходимо кратко изложить научное содержание статьи. Во введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, краткий анализ известных из научной литературы решений, критику их недостатков и преимущества (особенности) предлагаемого подхода. В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи может быть разбит на отдельные разделы: «Постановка задачи», «Основной результат», «Результаты моделирования» и т.п. В заключении необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований.

Все статьи проходят процедуру рецензирования. После ее завершения автору направляется экземпляр рукописи с замечаниями рецензента и научного редактора для доработки. При опубликовании статьи указываются даты ее поступления и последующих переработок.

Объем статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 6 страниц. Оригинал-макет статьи выполняется в редакторе Word for Windows. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 pt, межстрочный интервал одинарный, поля сверху 20 мм, остальные поля 25 мм. Абзацный отступ 10 мм. Аннотация печатается шрифтом Times New Roman 10 обычный, межстрочный интервал одинарный, выравнивается по ширине страницы. Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, отделяется от предыдущего раздела полуторной пустой строкой, а от последующего текста одной пустой строкой. Название подраздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, пустыми строками не отделяется. Формулы набираются в редакторе Microsoft Equation Ed. 3.0. Параметры стиля: текста ─ Times New Roman, прямой; функции ─ Times New Roman, прямой; переменной ─ Times New Roman, наклонный; греческих букв ─ Symbol, прямой; символов ─ Symbol, прямой; матрицы-вектора ─ Times New Roman, прямой, полужирный; чисел ─ Times New Roman, прямой. Размеры: обычный ─ 12 pt, крупный индекс ─ 10 pt, мелкий индекс ─ 8 pt, крупный символ ─ 16 pt, мелкий символ ─ 12 pt. Отдельные переменные в тексте допускается набирать в текстовом режиме с соблюдением требований, указанных для формул. Разделительный знак десятичных дробей ─ запятая.

При оформлении рисунков и графиков используется шрифт Times New Roman. Стиль написания переменных должен соответствовать требованиям к основному тексту. Используются только единицы измерения, соответствующие системе СИ. Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Нумерация позиций ─ согласно очередности ссылок в тексте.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. **Более подробную информацию смотрите на сайте http: //ntv.ifmo.ru**

PRESENTATION RULES FOR MANUSCRIPTS

Editorial board takes into consideration original papers (not previously published, with the exception of science conferences materials) within subject area of the journal, presenting new scientific results obtained personally by the authors. We also publish roundups, characterizing the present status of science and technology important fields, conferences reports, scientific discussions materials and new books reviews. The journal subject area includes sections reflecting advances in science, engineering and technology in the modern instrumentation field for the following directions: optics, optical systems and technology, optical materials technology and nanotechnologies, information and computer systems and technologies, information security methods and systems, system analysis, automatic control systems, mechatronics, computer-aided design systems, microelectronics, biomedical technologies. The journal also publishes papers in economics and finance as additional sections.

The material must be presented in accordance with the following structure. The abstract of 200─250 words should contain article scientific contents in brief. The introduction should provide a meaningful statement of the issue, a brief analysis of the known solutions from scientific literature, criticism of their shortcomings and advantages (features) of the proposed approach. The main text should represent rigorous formulation of the problem, set out and explain in detail (prove) the allegations and conclusions, give the results of experimental research or mathematical modeling for the made statements illustration. The main text of the article can be divided into separate sections: “Problem Statement”, “Main Result”, “Simulation Results”, etc. In conclusion, the main results should be briefly formulated, comments on them should be given and, if possible, the direction of future researches should be indicated.

All articles are reviewed. After reviewing is completed, the manuscript is sent to the author with reviewer’s and scientific editor’s comments for improvement. When the article is published, the dates of its receipt and subsequent revisions are specified.

The volume of the article, including illustrations, tables and references, should not exceed 6 pages. Dummy layout of the article is done in Word editor for Windows. Font - “Times New Roman”, font size - 12 pt, single line spacing, upper margins - 20 mm, the rest of them - 25 mm. Indention is 10 mm. The abstracts are printed in “Times New Roman” font, size 10 normal, single line spacing, aligned to the width of the page. Section name is printed in “Times New Roman”, size 12, bold, single line spacing, separated from the previous section by one-and-a-half empty line, and from the subsequent text by one blank line. Subsection name is printed in “Times New Roman 12”, bold, single line spacing, not separated by blank lines. Formulas are entered in Microsoft Equation Ed. 3.0 editor. Style options: text ─ Times New Roman, straight, functions ─ Times New Roman, straight, variable ─ Times New Roman, italic, Greek letters ─ Symbol, straight; characters ─ Symbol, straight, matrix-vector ─ Times New Roman, straight, bold; numbers ─ Times New Roman, straight. Dimensions: standard ─ 12 pt, large index ─ 10 pt, small index ─ 8, pt, large symbol ─ 16 pt, small symbol ─ 12 pt. Some variables in the text are allowed to type in text mode with the requirements specified for the formulas. Separating character for decimals ─ comma. “Times New Roman” font is used for drawings and graphics. Variables writing style must comply with the main text. Only units that correspond to the SI system should be used. List of references is made in accordance with GOST 7.0.5-2008. Position numbering is according to the order of links in the text.

Graduate students’ manuscript publications are free of charge. **For more information, please visit http://ntv.ifmo.ru**

Подписано к печати 15.10.2013 Тираж 350 экз. Заказ № 36(88)

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-47243 от 10.11.2011 г.
Подписной индекс 47 197 (подписка на I полугодие), 70 522 (годовая подписка) по каталогу агентства Роспечать (Газеты. Журналы)

SCIENTIFIC AND TECHNICAL
JOURNAL
OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
NIOVEMBER-DECEMBER 2013 NUMBER 6 (88) ISSN 2226-1494
NAUCHNO-TEKHNICHESKIJ VESTNIK INFORMATSIONNYKH TEKHNOLOGIJ, MEKHANIKI I OPTIKI

REVIEW ARTICLE
Infrared tomography of hot gas: mathematical model of active-passive diagnosis — *V. Sizikov* — *1*

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES
Investigation of output signal amplitude dependence in homodyne demodulation scheme for phase fiber-optic sensor — *M. Plotnikov, A. Kulikov, V. Strigalev* — *18*
Dependence investigation of the anisotropic single-mode fiber parameters on a winding diameter — *S. Aksarin, S. Arkhipov, S. Varzhel, A. Kulikov, V. Strigalev* — *22*
Phase characteristic stabilization of the fiber-optical sensor signal in terms of temperature change — *A. Aleynik, I. Deineka, A. Makarenko, M. Mekhrengin, V. Strigalev* — *26*
Thermal instability influence of the radiation source characteristics on the signal in terms of temperature change — *A. Aleynik, I. Deineka, A. Makarenko, M. Mekhrengin, V. Strigalev* — *31*

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICSS
Statistical analysis of geometrical parameters for objects with radial symmetry — *K. Samusev, M. Rybin, M. Limonov* — *36*
Comparison methods of stereo vision algorithms for 3D face reconstruction — *S. Ponomarev* — *40*
Analysis of properties for hierarchical image representation in modern computer vision systems — *V. Vasilev, I. Gurov, A. Potapov* — *45*
Method for dynamic data processing in the spectral optical coherent tomography with compensation of dispersion influence — *M. Volynsky, I. Gurov* — *50*

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS
Interval estimation system design for testosterone hormone dynamics model — *D. Efimov, A. Kremlev, T. Kharkovskay, S. Chebotarev* — *56*
Method of interferometer signal phase measurement — *G. Miroshnichenko, I. Deyneka, D. Pogorelaya, F. Shuklin, M. Smolovik* — *61*
Calculation method of the transient temperatures for moving space object on the elliptical orbit — *Yu. Bayova, Ye. Lapovok, S. Khankov* — *67*

MECHANICS AND MECHATRONICS
Errors modeling of gravity meter gyrostabilizer with the fiber-optic gyroscopes — *A. Dzyuba, L. Staroseltsev* — *73*

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES
Typification tools and pragmatics of ORG-Master modeling language — *D. Kudryavtsev, D. Koznov, L. Grigoryev* — *79*
A new approach of temperature measurements of field programmable gate arrays local area based on the Monte-Carlo method — *P. Kustarev, S. Bykovsky* — *86*
Design principles of a combined network topology for advanced on-board computing system — *E. Kniga, I. Zharinov* — *92*
Principles of functional organization for group of field geophysical devices of the new generation — *V. Denisov, A. Radilov* — *98*
Agents interaction in information system for the enterprise with the adaptation of mechanisms and user interface — *A. Vladimirov* — *105*

MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES
Effect of metallic islet films on aggregation and molecular absorption enhancement of pseudoisocyanine — *N. Toropov, T. Vartanyan* — *112*
Research and development of luminescent nanocomposites for integrated optical microchips — *I. Denisiuk, J. Burunkova, N. Sobeshchuk* — *116*
Precise manipulation of micro- and nanoparticles under the electron beam — *A. Denisyuk, F. Komissarenko* — *118*
Optical properties of PbSe quantum dots formed in fluorine phosphate glass — *E. Kolobkova, A. Polyakova, A. Abdrshin, A. Trofimov, N. Nikonorov, V. Aseev* — *123*
Self-organization of lead sulfide quantum dots of different sizes — *E. Ushakova, V. Golubkov, A. Litvin, P. Parfenov, A. Baranov* — *127*

COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS
Local minimization of the bured vias number in the printed circuit topology — *S. Luzin, S. Popov, Yu. Popov* — *133*
Formation and display principles for an array of geoinformation data by means of onboard display screen — *P. Paramonov, M. Kostishin, I. Zharinov, V. Nechaev, S. Sudarchikov* — *136*

INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION
Surface roughness impact on the corrosion resistance of the products in mechanical engineering — *A. Ivanov, D. Leonov* — *143*

INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS
Users distinction based on their behavior in the Internet — *D. Yurasov, I. Zikratov* — *148*

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT
National innovative system: structure and role of financial component — *T. Krasnoperova* — *152*

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION
Improvement of training programs for human resource managers on the basis of learning styles analysis — *E. Karpova* — *157*

BRIEF REPORTS
Automated hardware-software system for control of extended radiation sources — *E. Gorbunova, V. Korotaev, V. Peretyagin* — *162*
Improvement of dynamic texture compression — *I. Perminov* — *164*

SUMMARY — *166*

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

1

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

УДК 535.3+517.926.4+519.642.7

ИНФРАКРАСНАЯ ТОМОГРАФИЯ ГОРЯЧЕГО ГАЗА: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНО-ПАССИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ

В.С. Сизиков

Сизиков Валерий Сергеевич – доктор технических наук, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры измерительных технологий и компьютерной томографии СПбНИУ ИТМО и Института международных образовательных программ при СПбГПУ. Области научных интересов – томография, обработка изображений, спектроскопия, гравиметрия, гидроакустика, астрофизика, прикладная математика, интегральные уравнения, некорректные задачи и регулярные методы их решения. Автор более 130 научных работ, из них 9 книг (монографии и учебники). Член Американского математического общества, референт журнала «Mathematical Reviews», член диссертационного совета при НИУ ИТМО. Научный руководитель шести кандидатских и консультант одной докторской диссертации.

Сформулированы основные задачи инфракрасной томографии горячего газа на примере пламени горелки (burner). Описан вариант, когда используются два режима диагностики пламени: активный (ON), с включенным источником просвечивания, и пассивный (OFF) – без источника. Выведены два интегральных уравнения относительно коэффициента абсорбции k и функции Планка B среды (по которой можно рассчитать температурный профиль среды T_g). В случае осевой симметрии и параллельного сканирования пламени уравнения преобразованы в одномерные сингулярные интегральные уравнения типа Абеля относительно k и B. Для их численного решения использованы обобщенный метод квадратур, сглаживание данных с помощью сплайнов и метод регуляризации Тихонова. Разработан пакет программ на MATLAB7. С его помощью выполнена обработка результатов экспериментальной диагностики пламени горелки при некотором волновом числе ν в некотором сечении пламени. Особенностью методики является то, что она не требует специального определения k путем прямого измерения или с помощью базы данных, например HITRAN/HITEMP. Обзор предназначен для студентов, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников, специализирующихся по томографии, интегральным уравнениям, некорректным задачам, прикладной математике и программированию.

Ключевые слова: ИК томография, активный и пассивный режимы диагностики, коэффициент абсорбции, температурный профиль, интегральные уравнения, осевая симметрия, параллельное сканирование.

Введение

Рассматривается задача инфракрасной (ИК) томографии (IR tomography) [1–4] горячего газа, согласно которой определяются характеристики газовой среды по результатам ее внешней диагностики посредством ИК излучения, проходящего через среду.

Области применения ИК томографии и решаемые задачи:

- определение распределения абсорбции (поглощения), эмиссии (излучения) и температуры горячих газов – пламени лабораторной горелки [5], плазмы [6–10], пламени котлов, топок и парогенераторов [11], горячих газовых потоков [12], например, газа, вытекающего из сопла ракеты;
- ИК спектроскопическая томография температуры и концентрации частиц применительно к диагностике горения и обжига пылевидного угля или биомассы [12];
- точечная (не по сечениям) диагностика, или лазерная термометрия пламени горелки на основе когерентного антистоксова Раман-рассеяния (coherent anti-Stokes Raman scattering, CARS) [5; 13, С. 303, 615];
- определение параметров слоистой атмосферы – температуры, давления, затухания, абсорбции, эмиссии и др. [14–16] в рамках спутниковой метеорологии [17];
- тепловая (ИК) томография неразрушающего контроля композиционных материалов – анализ изменения поверхностной температуры материалов во времени с помощью нейронной сети из персептронов, тепловой контроль углепластика в авиакосмической промышленности и др. [18];
- в биомедицинской оптике – зондирование биотканей (кожи и др.) излучением ближнего ИК диапазона [19];
- ИК томография времени жизни и диффузионной длины носителей заряда в слитках полупроводникового кремния [20].

Видим, что область применения ИК томографии довольно широкая и разнообразная. Однако мы остановимся, главным образом, на ИК томографии горячих газов, в которых имеют место абсорбция и

эмиссия (примеры: пламя лабораторной горелки, котлов, топок и парогенераторов, плазма, газ, вытекающий из сопла ракеты). Это – одна из задач физики горения (combustion) [4, 5, 21, 22]. При этом будем также иметь в виду примыкающую задачу определения параметров атмосферы на основе ИК радиации, эмитированной атмосферой и перехватываемой сенсорами спутников, как задачу удаленного восприятия (remote sensing) профиля атмосферной температуры [17]. Задачи ИК томографии горячих газов и определения параметров атмосферы имеют ту общность, что они все используют дифференциальное уравнение переноса излучения (в разных вариантах).

Объяснение различий РКТ и ИК томографии. Задача ИК томографии имеет как сходства, так и различия с рентгеновской компьютерной томографией (РКТ) [8, 23–28]. Как известно [13, С. 227, 638], область длин волн λ рентгеновских лучей составляет примерно 10^{-5}–10^{2} нм, а ИК излучение занимает широкую область от 740 до $2\cdot10^{6}$ нм, но мы будем рассматривать более узкую область ИК излучения – от 2000 до 15000 нм. При этом будем рассматривать область температур среды T_g от 1000 до 2000ºС. На рис. 1 приведена функция Планка *B* для длин волн λ от 0 до 15000 нм и для трех значений T_g. Из рис. 1 видно, что в области длин волн рентгеновских лучей функция Планка *B* имеет очень малые значения, а значит, излучательная способность ε практически отсутствует. В области же длин волн ИК томографии функция Планка имеет повышенные значения, поэтому излучательная способность среды существенна. Это порождает следующие различия РКТ и ИК томографии.

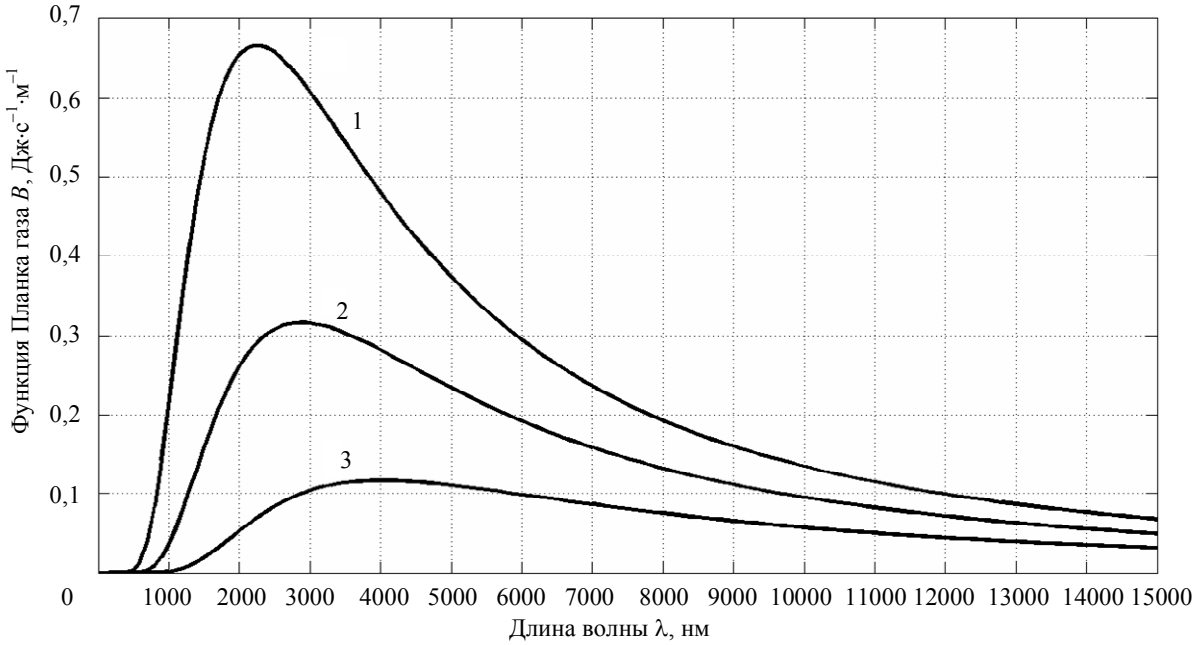


Рис. 1. Функция Планка газа $B(\lambda, T_g)$. 1 – $T_g = 2000°\text{C}$; 2 – $T_g = 1500°\text{C}$; 3 – $T_g = 1000°\text{C}$

В РКТ имеет место лишь поглощение (абсорбция) сканирующих лучей, проходящих через вещество; искомой функцией является одна функция – коэффициент абсорбции *k*; используется лишь активный режим (с включенным источником просвечивания); необходимо решать лишь одно уравнение – интегральное уравнение (ИУ) Радона относительно *k*.

В ИК томографии имеет место не только абсорбция, но и эмиссия газа, поэтому искомыми функциями являются две – коэффициент абсорбции *k* и коэффициент излучения ε, связанный с функцией Планка среды *B* (которая связана с температурным профилем среды T_g); в идеале необходимы (как, например, в [4]) два режима измерений: активный (в [4] он назван режимом ON – с источником или с зеркалом [1]) и пассивный (в [4] он назван режимом OFF – без источника и без зеркала [1], когда источником излучения является сама среда), и нужно решать два интегральных уравнения (ИУ) относительно *k* и *B*. Однако часто [2, 3] рассматривают лишь режим ON и получают одно (дифференциальное или интегральное) уравнение относительно двух искомых функций, *k* и *B*. Чтобы преодолеть этот дефицит данных (одно уравнение и две искомых функции), нередко полагают [2], что коэффициент *k* измерен (некоторым образом) или используют базу данных HITRAN/HITEMP [29, 30] и подобные для определения *k*.

В данной работе для ИК томографии горячего газа используются два режима измерений – ON и OFF. Будут получены два ИУ относительно двух функций *k* и *B*. Заметим, что в работах [1, 4] и др. также сформулирована задача эмиссионно-абсорбционной томографии на основе измерений с внешним источником или зеркалом и без него (with and without an external source or mirror). В работе [1] для выполнения

диагностики осесимметричной плазмы использовано зеркало (которое предложил ранее Pearce), расположенное с противоположной стороны от детектора (приемника) (рис. 2). Зеркало позволяет обойтись без источника, заменяя его. В дальнейшем вместо схемы с зеркалом стали использовать систему источник–приемник (как и в данной работе), при этом уравнения, полученные в [1] для схемы с зеркалом, оказались в общем и целом справедливыми для системы источник–приемник.

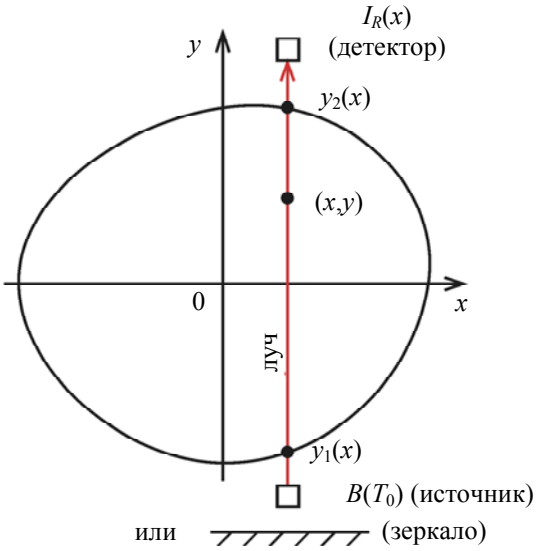


Рис. 2. Прохождение луча через *z*-сечение пламени

В [4] отмечено, что разность ON и OFF измерений позволяет определить коэффициент абсорбции k, а затем определить функцию Планка B и температуру T_g. Приведены выражения для интенсивностей в виде контурных интегралов и реконструктивные алгоритмы Рамачандрана–Лакшминарайяна и Шеппа–Логана. Однако в [4] методика изложена слишком кратко; при этом не использованы такие эффективные приемы, как сглаживание экспериментальных данных, регуляризация и т.д. (эти вопросы рассмотрены в других публикациях – см. дальше).

Заметим, что в обратной задаче диагностики плазмы [2–4, 6–10] используется как активный режим (просвечивание плазмы), так и пассивный режим, когда источником излучения является сама плазма, однако задача не доведена до двух интегральных уравнений. Также не доведена до двух уравнений методика диагностики слоистой атмосферы [14–17].

В данной работе эти вопросы рассмотрены объединенно и по-новому.

Основные соотношения

Уравнение переноса ИК излучения. Рассмотрим горелку (burner) [5], создающую ламинарное ровное пламя (рис. 3). Такая горелка часто используется для тестирования различных методов и алгоритмов [2–5].

Пусть через некоторое *z*-сечение пламени параллельно оси y (рис. 3) передается монохроматическое излучение абсолютно черного тела (а.ч.т.)

$$B(T_0) = \frac{2hc^2\nu^3}{\mathrm{e}^{hc\nu/k_\mathrm{B}T_0} - 1}, \tag{1}$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, $\nu = 1/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, k_B – постоянная Больцмана, T_0 – температура а.ч.т.

Излучение, посылаемое источником (а.ч.т), испытывает абсорбцию с коэффициентом абсорбции $k = k(x, y)$. Кроме того, среда излучает с коэффициентом излучения $\varepsilon = \varepsilon(x, y) = \varepsilon(T_g(x, y))$, где $T_g = T_g(x, y)$ – распределение температуры по *z*-сечению среды. Имеет место дифференциальное уравнение переноса излучения с учетом абсорбции и эмиссии, но без рассеяния [1–4, 8, 14, 31]:

$$\frac{dI(x, y)}{dy} = -k(x, y)\, I(x, y) + \varepsilon(x, y), \tag{2}$$

где $I(x, y)$ – искомая интенсивность излучения, причем $k(x, y(x)) = 0$ при $y(x) < y_1(x)$ и $y(x) > y_2(x)$, где $y_1(x)$ и $y_2(x)$ – границы среды (рис. 2).

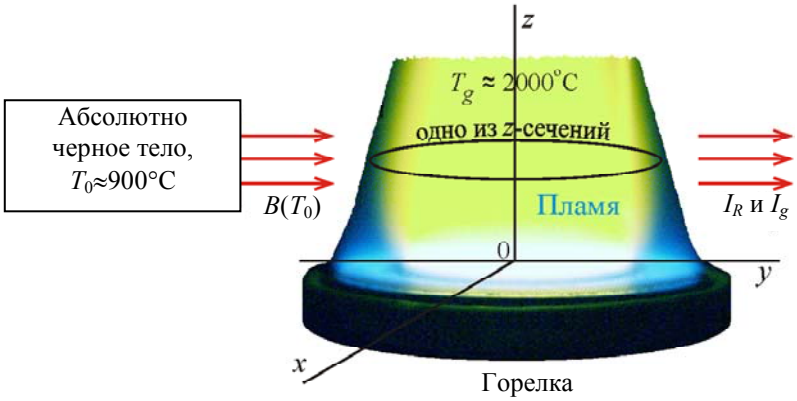


Рис. 3. Горелка

Полагаем, что в каждой точке (x, y) имеет место локальное термодинамическое равновесие [31]. Это позволяет использовать закон Кирхгофа [31]: отношение излучательной и поглощательной способностей равно $\frac{\varepsilon}{k} = B(T_g)$, где $B(T_g)$ – функция Планка для среды (ср. (1)):

$$B(T_g) = B(T_g(x, y)) = \frac{2hc^2\nu^3}{e^{hc\nu/k_B T_g(x,y)} - 1}, \tag{3}$$

или $\varepsilon(x, y) = k(x, y)\, B(T_g(x, y))$. В результате уравнение переноса излучения (2) примет вид (ср. [2, 9, 14])

$$\frac{dI(x, y)}{dy} = k(x, y)\left[B(T_g(x, y)) - I(x, y)\right], \tag{4}$$

где x играет роль параметра, т.е. уравнение (4) справедливо при каждом значении x (см. рис. 4, где представлена схема параллельного сканирования некоторого z-сечения пламени при некотором ракурсе φ).

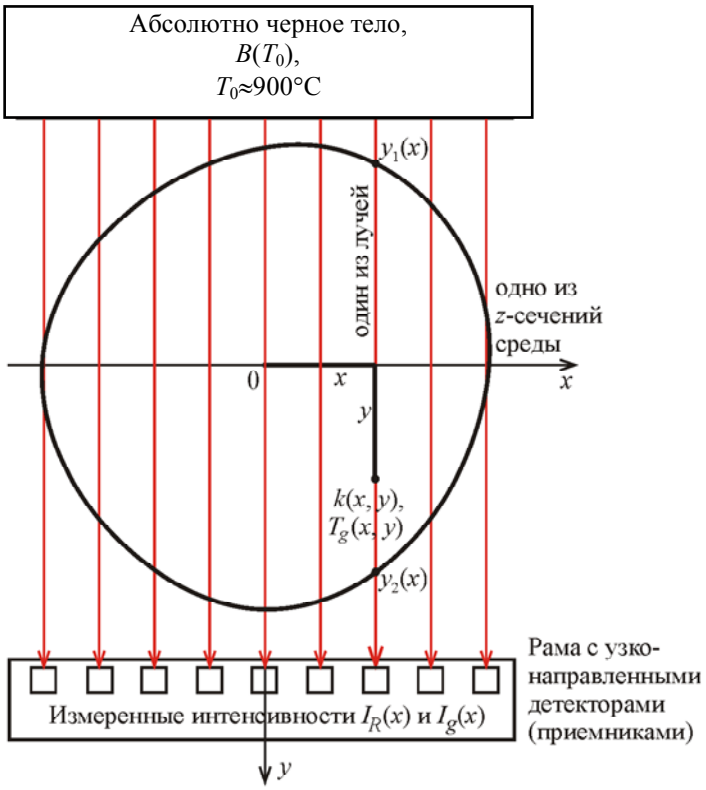


Рис. 4. Параллельное прохождение лучей через z-сечение пламени

Аналитическое решение уравнения переноса излучения. Решение уравнения (4) для каждой точки (x, y) каждого луча имеет следующий вид (ср. [1, 2, 4, 9, 31; 32, С. 308]):

$$I(x,y)=B(T_0)\exp\left(-\int\limits_{y_1(x)}^{y}k(x,y')\,dy'\right)+\int\limits_{y_1(x)}^{y}k(x,y')\,B(T_g(x,y'))\exp\left(-\int\limits_{y'}^{y}k(x,y'')\,dy''\right)dy'.$$

Для дальнейшей обработки более важна интенсивность на детекторе:

$$I_R(x)=B(T_0)\exp\left(-\int\limits_{y_1(x)}^{y_2(x)}k(x,y)\,dy\right)+\int\limits_{y_1(x)}^{y_2(x)}k(x,y)\,B(T_g(x,y))\exp\left(-\int\limits_{y}^{y_2(x)}k(x,y')\,dy'\right)dy. \quad (5)$$

Соотношение (5) следует рассматривать как ИУ относительно двух функций k и B. Чтобы уравнений было также два, помимо активного режима ON с источником (1), дающего функцию I_R, используем режим пассивной диагностики пламени OFF, когда нет источника и его роль играет само пламя. Обозначим измеренную детекторами интенсивность в режиме OFF через $I_g(x)$. Выражение для $I_g(x)$ имеет вид (ср. [1, 4] и (5)):

$$I_g(x)=\int\limits_{y_1(x)}^{y_2(x)}k(x,y)\,B(T_g(x,y))\exp\left(-\int\limits_{y}^{y_2(x)}k(x,y')\,dy'\right)dy\,. \quad (6)$$

Теперь задачу можно сформулировать следующим образом: по двум измеренным функциям I_R и I_g нужно определить две функции k и B путем решения системы двух ИУ (5) и (6). Однако искомые функции k и B – это функции двух переменных x и y, а исходные (измеренные) функции I_R и I_g – функции лишь одной переменной x. Исходя из этого, необходимо, как в РКТ, выполнить измерения под разными ракурсными углами φ и получить $I_R(x,\varphi)$ и $I_g(x,\varphi)$ или рассмотреть, например, случай, когда изолинии k и B являются окружностями (случай осевой симметрии, см. дальше). В этом случае искомые функции будут функциями одной переменной: $k=k(r)$, $B=B(T_g(r))$, где r – расстояние от оси пламени.

Данную задачу можно упростить. Обозначим через I_T разность двух измеренных функций I_R и I_g, т.е. $I_T(x)=I_R(x)-I_g(x)$. Получим уравнение, описывающее процесс абсорбции без эмиссии в активном режиме:

$$I_T(x)=B(T_0)\exp\left(-\int\limits_{y_1(x)}^{y_2(x)}k(x,y)\,dy\right). \quad (7)$$

В результате получаем не систему двух ИУ, а два самостоятельных ИУ, решаемых последовательно: сначала решается уравнение (7) относительно $k(x,y)$, а затем уравнение (6) относительно $B(T_g(x,y))$ при уже найденной $k(x,y)$. После вычисления $B(T_g(x,y))=B(x,y)$ можно рассчитать температурный профиль (см. (3)):

$$T_g(x,y)=\frac{hc\nu/k_{\text{B}}}{\ln\left(\dfrac{2hc^2\nu^3}{B(x,y)}+1\right)}\,. \quad (8)$$

При этом функции I_T и I_g должны быть получены, как сказано выше, под различными ракурсами φ, т.е. получены $I_T(x,\varphi)$ и $I_g(x,\varphi)$ или же рассмотрена схема осевой симметрии (в принципе, при одном ракурсе), когда $I_T=I_T(x)$, $I_g=I_g(x)$, $k=k(r)$, $B=B(T_g(r))$.

Случай осевой симметрии и параллельного сканирования

Рассмотрим случай, когда в каждом z-сечении пламени изолинии постоянных k и T_g (а также ε) являются окружностями, т.е. имеет место круговая (осевая) симметрия. Кроме того, полагаем, что выполняется параллельное сканирование (рис. 5). Вариант осевой симметрии и параллельного сканирования рассмотрен в ряде работ ([1, 4, 8, 9, 21, 22, 33] и др.). В данной работе дается дальнейшее развитие этого варианта.

Определение коэффициента абсорбции *k*. Рассмотрим ИУ (7) относительно $k(x,y)$. Учтем осевую симметрию пламени. Введем вместо y новую переменную r (расстояние от z-оси симметрии), и уравнение (7) примет вид сингулярного интегрального уравнения (СИУ) Абеля:

$$2\int\limits_{x}^{R}\frac{r}{\sqrt{r^2-x^2}}k(r)dr=q(x),\quad 0\le x\le R, \quad (9)$$

где

$$q(x) = -\ln \frac{I_T(x)}{B(T_0)}. \qquad (10)$$

Рассмотрим вопрос о численном решении СИУ (9). Отметим следующие основные алгоритмы численного решения уравнения (9) (ср. [34]).

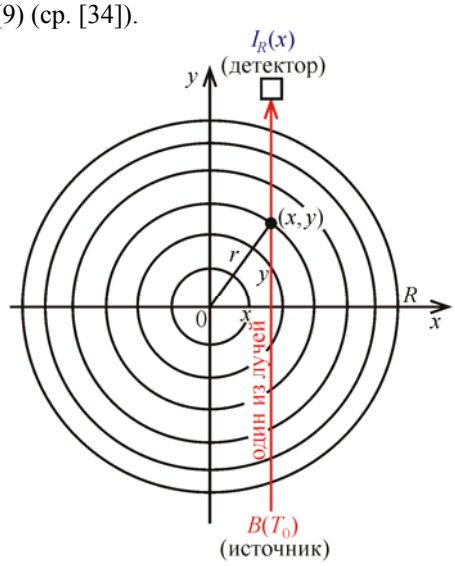


Рис. 5. Осевая симметрия и параллельное сканирование пламени

Алгоритм 1 (сдвиг сеток узлов) [35–38]. Вводятся дискретные сетки узлов по переменным r и x: $r_j = jh$, $x_i = r_i + \Delta$, $j, i = 0, 1, \ldots, n$, $r_n = R$, где $h = R/n$ – шаг дискретизации, Δ – сдвиг между сетками, равный $\Delta = h/2$ [35, С. 8; 37, С. 273], или $\Delta \in [0, h/2]$ [36, С. 27], или $\Delta \in (0, h/2)$ [38]. Введение сдвига Δ позволяет устранить особенности при использовании численных методов, например, метода квадратур.

Алгоритм 2 (варианты метода квадратур). В работе [35, С. 8] при построении метода дискретных вихрей (одного из вариантов метода квадратур) интеграл в уравнении $\frac{1}{2\pi}\int_{-1}^{1} \frac{\gamma(x)dx}{x - x_0} = f(x_0), \quad x_0 \in (-1, 1)$ (связанном с уравнением типа (9)) расписывается по формуле левых прямоугольников и используются сетки по x и x_0 со сдвигом $\Delta = h/2$. В результате получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно значений $\gamma_j \equiv \gamma(x_j)$.

В работах [21, 33] изложен метод под названием «onion-peeling» («луковая кожура»), в котором область $r \in [0, R]$ аппроксимируется кольцами постоянных значений k между $r_j - \Delta r/2$ и $r_j + \Delta r/2$ для каждого r_j. Сетки узлов по r и x полагаются одинаковыми (без сдвига). Особенность метода состоит в том, что интеграл $\int_{r_j - \Delta r/2}^{r_j + \Delta r/2} \frac{r\,dr}{\sqrt{r^2 - x_i^2}}$ при $r_j - \Delta r/2 \geq x_i$ берется аналитически и имеет конечное значение. Далее используется формула средних прямоугольников, и получается СЛАУ с верхней прямоугольной матрицей. Похожий метод изложен в работе [34].

Алгоритм 3 (аппроксимация решения) [6, С. 154]. В работах [36, С. 15, 27; 39, С. 149, 159] искомое решение $k(r)$ и (или) $q(x)$ аппроксимируется алгебраическим или тригонометрическим многочленом или полиномиальным сплайном, коэффициенты которого определяются из условия минимума невязки, что приводит к проекционному методу (Галеркина, коллокации и др.) и к решению СЛАУ.

В перечисленных алгоритмах имеет место саморегуляризация, причем в случае использования сдвига сеток величина сдвига Δ играет роль параметра регуляризации: чем ближе Δ к $h/2$, тем устойчивее решение $k(r)$, но меньше разрешающая способность численного метода, и чем ближе Δ к 0, тем менее устойчиво решение, но выше разрешение. Кроме того, во всех алгоритмах получаются СЛАУ с преобладающей (но не бесконечной) диагональю матрицы.

Отметим еще ряд алгоритмов. Уравнение (9), как известно, имеет аналитическое решение [6, 8, 21, 22, 33, 34]

$$k(r) = -\frac{1}{\pi}\int_{r}^{R} \frac{q'(x)}{\sqrt{x^2 - r^2}}\,dx, \quad 0 \leq r \leq R. \qquad (11)$$

Однако решение (11) содержит производную $q'(x)$ от экспериментальной, а значит, зашумленной функции $q(x)$, а задача дифференцирования является некорректной [40, С. 18]. Кроме того, интеграл в (11) является несобственным (сингулярным). Тем не менее, для вычисления решения согласно (11) предложен ряд следующих алгоритмов.

Алгоритм 4 (интерполяция и метод квадратур). В работе [33] для вычисления производной $q'(x)$ использована интерполяция по трем, а также по двум соседним точкам. Интеграл в (11) $\int_r^R \frac{dx}{\sqrt{x^2-r^2}}$ вычисляется аналитически. Похожий алгоритм изложен в работе [34] (использована обобщенная формула левых прямоугольников).

Алгоритм 5 (аппроксимация $q(x)$) [7, 41, 42]. Функция $q(x)$ аппроксимируется линейной комбинацией сглаживающих полиномов (или сплайнов) на всем интервале $x \in [0, R]$. Вычисляется $q'(x)$ путем дифференцирования полинома (или сплайна). Решение $k(r)$ согласно (11) вычисляется путем суммирования интеграла в (11) по отрезкам, что выполняется аналитически [7, С. 188–189].

Алгоритм 6 (без использования $q'(x)$). В работе [43] выражение (11) с помощью интегрирования по частям преобразовано в выражение, не содержащее производной $q'(x)$ [6–8, 21]:

$$k(r) = -\frac{1}{\pi}\left\{\frac{q(R)-q(r)}{\sqrt{R^2-r^2}} + \int_r^R \frac{x[q(x)-q(r)]}{\sqrt{(x^2-r^2)^3}}dx\right\}, \quad 0 \le r \le R.$$

Данный алгоритм реализован в работе [7, С. 217–220] с использованием кубического сплайна [44, P. 273] для $q(x)$.

Алгоритм 7 (с использованием регуляризации). ИУ Абеля (9) вследствие сингулярности имеет, с одной стороны, сложности в реализации алгоритмов, а с другой стороны, обладает саморегуляризацией, в результате чего задача его решения является умеренно некорректной [21]. В ряде работ ([21, 22, 45] и др.) для повышения устойчивости алгоритмов использован метод регуляризации Тихонова [40, 46–48].

В данной работе рассматривается решение уравнения (9) относительно искомой функции $k(r)$, а также численное вычисление $k(r)$ согласно (11). Новым является комплексный подход – предварительное сглаживание экспериментальных функций I_R и I_g, использование обобщенного метода квадратур (в модификации) для решения уравнения (9) и вычисления (11) и метода регуляризации Тихонова.

Обобщенный метод квадратур решения сингулярного интегрального уравнения

Рассмотрим СИУ (9). В работе [33] предложен, а в работе [21] реализован численный метод «onion-peeling», в котором использованы равномерные совпадающие сетки узлов по *r* и *x* и квадратурная формула средних прямоугольников для вычисления интеграла в (9). В работе [34] применены также равномерные совпадающие сетки по *r* и *x* и формула левых прямоугольников.

В данной работе используются неравномерные сетки и квадратурная формула левых прямоугольников, что порождает более общий и удобный алгоритм.

Итак, рассмотрим решение уравнения (9) на сетках узлов, вообще говоря, неравномерных и несовпадающих:

$$0 \le x_1 \le r_1 < x_2 \le r_2 < x_3 \le r_3 < \ldots < x_i \le r_i < \ldots < x_n \le r_n \le R \tag{12}$$

или $r_i = x_i + \Delta_i$, $\Delta_i \in [0, (x_{i+1} - x_i)/2]$. Здесь $R = r_{\max}$ – граничное значение, при котором $k(R) = 0$. На каждом промежутке $[r_j, r_{j+1})$, $j \in [1, n-1]$ полагаем приближенно $k(r) = k(r_j) \equiv k_j = \text{const}$. Получим

$$\int_{r_j}^{r_{j+1}} \frac{r}{\sqrt{r^2-x^2}} k(r)\,dr = \left(\sqrt{r_{j+1}^2 - x^2} - \sqrt{r_j^2 - x^2}\right) k_j, \quad j \in [1, n-1], \quad x \le r_j < r_{j+1} \le R, \tag{13}$$

– обобщенную квадратурную формулу левых прямоугольников для сингулярности $r\big/\sqrt{r^2-x^2}$, причем множители $\left(\sqrt{r_{j+1}^2 - x^2} - \sqrt{r_j^2 - x^2}\right)$ являются квадратурными коэффициентами этой формулы. Специфика формулы состоит в том, что сингулярный интеграл $\int_{r_j}^{r_{j+1}} \frac{r}{\sqrt{r^2-x^2}}dr$ вычисляется аналитически точно и без особенности. Если же вычислять его численно по обычной квадратурной формуле левых прямоугольников, то при $x = r_j$ возникает деление на ноль.

Интеграл в (9) есть сумма интегралов (13):

$$\int_{x_i}^{R} \frac{r}{\sqrt{r^2 - x_i^2}} k(r)\, dr = \sum_{j=i}^{n-1} \left(\sqrt{r_{j+1}^2 - x_i^2} - \sqrt{r_j^2 - x_i^2} \right) k_j, \quad i \in [1, n-1].$$

В результате СИУ (9) преобразуется в

$$\sum_{j=i}^{n-1} p_{ij}\, k_j = q_i/2,\ i \in [1, n-1], \text{ где } p_{ij} = \sqrt{r_{j+1}^2 - x_i^2} - \sqrt{r_j^2 - x_i^2}, \tag{14}$$

т.е. СЛАУ с верхней треугольной матрицей $(n-1)\times(n-1)$ относительно k_j, $j \in [1, n-1]$. Рекуррентное решение СЛАУ (14) имеет следующий вид:

$$\left.\begin{aligned} & k_{n-1} = \frac{q_{n-1}/2}{p_{n-1,n-1}}, \quad k_n = k_{n-2} + \left(\frac{r_n - r_{n-2}}{r_{n-1} - r_{n-2}} \right) \cdot (k_{n-1} - k_{n-2}), \\ & k_i = \frac{q_i/2 - \sum_{j=i+1}^{n-1} p_{ij} k_j}{p_{ii}}, \quad i = n-2, n-3, \ldots, 1, \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

где $k_i \equiv k(r_i)$, $q_i \equiv q(x_i)$. В решение (15) добавлено вычисление k_n с помощью линейной экстраполяции [49, С. 213, ф. (8.80)]. В работе [33] также приведены формулы типа (13), но для случая равномерных и совпадающих сеток по *r* и *x* и с использованием формулы средних прямоугольников, при этом формулы типа (15) не приведены. Формулы (12)–(14) являются более общими и удобными, чем в работах [21, 33], а формула (15) – явной. Метод согласно (12)–(15) назван в работе [34] обобщенным методом квадратур решения СИУ (9).

Приведенный метод согласно (12)–(15) может быть применен также к численному вычислению решения $k(r)$ согласно (11) (ср. [33, 34]), однако в данной работе мы ограничимся численным вычислением $k(r)$ путем решения СИУ (9) согласно (12), (15).

Определение функции Планка *B*. Теперь рассмотрим соотношение (6) как ИУ относительно $B(x, y) = B(T_g(x, y))$ при уже найденной $k(x, y)$. Соотношение (6) можно записать в виде

$$\int_{y_1(x)}^{y_2(x)} \tilde{k}(x, y)\, B(x, y)\, dy = I_g(x), \quad -R \le x \le R, \tag{16}$$

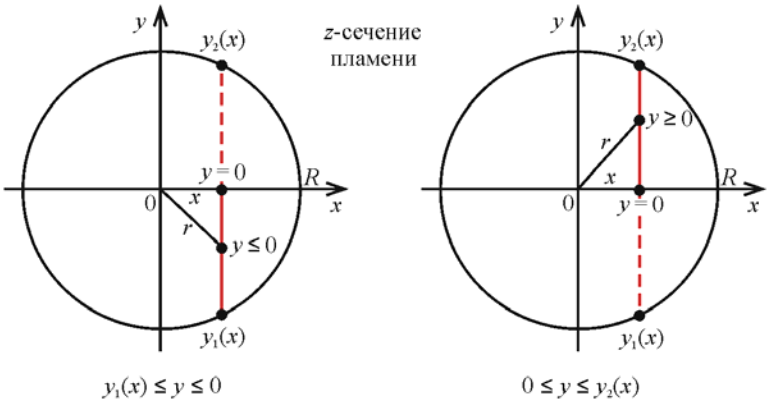
где

$$\tilde{k}(x, y) = k(x, y) \exp\left(-\int_{y}^{y_2(x)} k(x, y')\, dy' \right) \tag{17}$$

– ядро интегрального уравнения, а $B(x, y) = B(T_g(x, y))$ – искомая функция.

Учтем осевую симметрию и параллельное сканирование. При этом, чтобы учесть особенности записи интегралов в (16) и (17) при использовании полярной координаты *r*, запишем интеграл (16) в виде суммы двух интегралов (рис. 6):

$$\int_{y_1(x)}^{y_2(x)} \tilde{k}(x, y)\, B(x, y)\, dy = \int_{y_1(x)}^{0} \tilde{k}(x, y)\, B(x, y)\, dy + \int_{0}^{y_2(x)} \tilde{k}(x, y)\, B(x, y)\, dy. \tag{18}$$



а б

Рис. 6. Осевая симметрия и параллельное сканирование пламени:
$y \in [y_1(x), 0]$ (а) и $y \in [0, y_2(x)]$ (б)

Для первого интеграла в (18) (т.е. при $y \le 0$) имеем $y = -\sqrt{r^2 - x^2}$, $dy = -\dfrac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}}\,dr$, а для второго интеграла (т.е. при $y \ge 0$) $y = \sqrt{r^2 - x^2}$, $dy = \dfrac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}}\,dr$. Сумма этих интегралов равна

$$\int_x^R \frac{r\,k(r)}{\sqrt{r^2 - x^2}} \exp\left\{-\left(\int_x^R + \int_x^r\right) \frac{r'\,k(r')}{\sqrt{r'^2 - x^2}}\,dr'\right\} B(r)\,dr + \int_x^R \frac{r\,k(r)}{\sqrt{r^2 - x^2}} \exp\left\{-\left(\int_x^R - \int_x^r\right) \frac{r'\,k(r')}{\sqrt{r'^2 - x^2}}\,dr'\right\} B(r)\,dr =$$

$$= \exp\left\{-\int_x^R \frac{r'\,k(r')}{\sqrt{r'^2 - x^2}}\,dr'\right\} \cdot \int_x^R \frac{r\,k(r)}{\sqrt{r^2 - x^2}} \left[\exp\left(\int_x^r \frac{r'\,k(r')}{\sqrt{r'^2 - x^2}}\,dr'\right) + \exp\left(-\int_x^r \frac{r'\,k(r')}{\sqrt{r'^2 - x^2}}\,dr'\right)\right] B(r)\,dr. \qquad (19)$$

В результате уравнение (16) с учетом (19) запишется в виде СИУ типа ИУ Абеля:

$$\int_x^R K(x,r)\; B(r)\,dr = Q(x), \quad 0 \le x \le R, \qquad (20)$$

где

$$K(x,r) = \frac{r\,k(r)}{\sqrt{r^2 - x^2}} \left(\mathrm{e}^{u(x,r)} + \mathrm{e}^{-u(x,r)}\right), \qquad (21)$$

$$Q(x) = I_g(x)\,\mathrm{e}^{u(x,R)}, \qquad (22)$$

$$u(x,r) = \int_x^r \frac{r'\,k(r')}{\sqrt{r'^2 - x^2}}\,dr', \quad 0 \le x \le R, \quad x \le r \le R. \qquad (23)$$

Видим, что, во-первых, само уравнение (20) является сингулярным, так как его ядро $K(x,r)$ (21) содержит сингулярный множитель, и, во-вторых, интеграл (23) является сингулярным. Используем, как и при решении СИУ (9), обобщенный метод квадратур. В результате сингулярный интеграл (23) будет приближенно равен (ср. (13))

$$\underset{i \in [1,n-1],\; j \ge i}{u(x_i, r_j)} = \begin{cases} 0, & j = i, \\ \displaystyle\sum_{j'=i}^{j-1} \left(\sqrt{r_{j'+1}^2 - x_i^2} - \sqrt{r_{j'}^2 - x_i^2}\right) k_{j'}, & j > i, \end{cases} \qquad (24)$$

на сетках узлов (12), а СИУ (20) с учетом (22)–(24) преобразуется в СЛАУ

$$\sum_{j=i}^{n-1} P_{ij}\, B_j = Q_i, \quad i \in [1, n-1], \qquad (25)$$

где

$$P_{ij} = \left(\sqrt{r_{j+1}^2 - x_i^2} - \sqrt{r_j^2 - x_i^2}\right) \cdot k_j \cdot \left(\mathrm{e}^{u(x_i, r_j)} + \mathrm{e}^{-u(x_i, r_j)}\right), \qquad (26)$$

$$Q_i = I_g(x_i) \cdot \mathrm{e}^{u(x_i, R)}. \qquad (27)$$

СЛАУ (25) имеет верхнюю треугольную матрицу $(n-1) \times (n-1)$. Ее рекуррентное решение (ср. (15)):

$$\left.\begin{aligned} & B_{n-1} = \frac{Q_{n-1}}{P_{n-1,n-1}}, \quad B_n = B_{n-2} + \left(\frac{r_n - r_{n-2}}{r_{n-1} - r_{n-2}}\right) \cdot (B_{n-1} - B_{n-2}), \\ & B_i = \frac{Q_i - \displaystyle\sum_{j=i+1}^{n-1} P_{ij}\, B_j}{P_{ii}}, \quad i = n-2, n-3, \ldots, 1, \end{aligned}\right\} \qquad (28)$$

где $B_i \equiv B(r_i)$, $Q_i \equiv Q(x_i)$, а P_{ij} и Q_i выражаются формулами (26) и (27). После получения $B(r)$ можно найти температурный профиль (см. (8)):

$$T_g(r) = \frac{hc\nu / k_{\mathrm{B}}}{\ln\left(\dfrac{2hc^2\nu^3}{B(r)} + 1\right)}. \qquad (29)$$

Использование регуляризации

Задача решения интегральных уравнений I рода (7) и (6), а также их частных случаев (9) и (20) является, строго говоря, некорректной, несмотря на то, что интегральные уравнения (9) и (20) являются сингулярными, а сингулярные ИУ обладают, как известно [35, С. 194; 37, С. 495], свойством естествен-

ной регуляризации, или саморегуляризации, обусловленным тем, что при их численном решении квадратурами матрица получающейся СЛАУ имеет преобладающую диагональ. Кроме того, интегральные уравнения Вольтерра I рода, к которым относятся ИУ (9) и (20), занимают промежуточное положение между ИУ Фредгольма I рода и Вольтерра II рода [46, С. 110–114]. Другими словами, задача решения ИУ Вольтерра I рода может быть корректной (well-posed) или некорректной (ill-posed) в зависимости от того, какими методами и в каких пространствах она решается.

В данной работе выясняется, в какой степени метод обобщенных квадратур (без регуляризации, но со сглаживанием результатов измерений, см. дальше) делает задачу решения СИУ (9) и (20) устойчивой и насколько повышает ее устойчивость метод регуляризации Тихонова (ср. [10, 21, 22, 40, 45–48]).

В задаче определения коэффициента абсорбции k запишем СЛАУ (14) в виде

$$Ak = f\,, \tag{30}$$

где

$$A_{ij} = \begin{cases} p_{ij}, & j \ge i, \\ 0, & j < i, \end{cases} \quad f_i = q_i/2, \quad i, j \in [1, n-1]\,. \tag{31}$$

Согласно методу регуляризации Тихонова, вместо (30) с учетом (31) решается СЛАУ

$$(\alpha I + A^T A)\, k_\alpha = A^T f\,, \tag{32}$$

где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, I – единичная матрица. Часто [10, 16, 21, 22, 45–47] регуляризованная СЛАУ записывается в виде

$$\left(\alpha L L^T + A^T A\right) k_\alpha = A^T f \tag{33}$$

или

$$\left(\alpha A L L^T + A^T A\right) k_\alpha = A^T f\,, \tag{34}$$

где матрица L $(n-1)\times n$ – дискретный лапласиан. Записи (33) и (34) имеют более высокий порядок регуляризации, чем (32).

Важным является вопрос о выборе параметра регуляризации α. Для выбора α обычно используются принцип невязки, критерий L-кривой, метод перекрестной значимости и др. [7, 10, 22, 46–48]. В данной работе мы остановимся на принципе невязки. Согласно нему, α выбирается согласно равенству

$$\left\| A k_\alpha - f \right\| = \delta\,, \tag{35}$$

где δ – верхняя оценка шума по норме: $\delta = \left\| \delta f \right\|_2$. Здесь $f = q/2$, поэтому (см. (10)) $\delta f = \dfrac{\delta q}{2} = \dfrac{1}{2}\dfrac{\delta I_T}{I_T}$.

Подробнее:

$$\delta = \frac{1}{2}\left\{ \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\delta I_T}{I_{T,\mathrm{s}}} \right)_i^2 \right\}^{1/2}, \tag{36}$$

где $\left|\delta I_T\right| = \left| I_{T,\mathrm{m}} - I_{T,\mathrm{s}} \right|$, $I_{T,\mathrm{m}}$ – измеренные (measured) значения I_T, а $I_{T,\mathrm{s}}$ – значения I_T, полученные аппроксимирующим (сглаживающим) сплайном (spline) (см. рис. 9), которые предлагается использовать в качестве «точных» значений I_T, поскольку точные значения I_T неизвестны в случае реальных (не модельных) измерений.

Невязка $\left\| A k_\alpha - f \right\|$ может быть записана как

$$\left\| A k_\alpha - f \right\|_2 = \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \left[(A k_\alpha)_i - f_i \right]^2 \right\}^{1/2} = \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \left[\sum_{j=i}^{n-1} A_{ij} (k_\alpha)_j - f_i \right]^2 \right\}^{1/2}. \tag{37}$$

Принцип невязки (35)–(37) эффективен, когда f зашумлена, а погрешность δ оценена надежно.

Если решается модельный пример с заданным точным коэффициентом абсорбции $\bar{k}$, то α нужно выбирать по минимуму относительной погрешности решения (ср. [45])

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\left\| k_\alpha - \bar{k} \right\|}{\left\| \bar{k} \right\|}, \tag{38}$$

где $\bar{k}$ – точный (заданный) коэффициент абсорбции.

Обозначим через α_{d} параметр регуляризации, выбранный по принципу невязки (discrepancy), а через α_{opt} – по минимуму погрешности ε_α (38).

В задаче определения функции Планка B запишем СЛАУ (25) в виде

$$AB = Q\,, \tag{39}$$

где

$$A_{ij} = \begin{cases} P_{ij}, & j \ge i, \\ 0, & j < i, \end{cases} \qquad i, j \in [1, n-1]. \tag{40}$$

Согласно методу регуляризации Тихонова, вместо (39) с учетом (40) решаем СЛАУ

$$(\alpha I + A^T A) B_\alpha = A^T Q. \tag{41}$$

Численные иллюстрации

Разработан пакет программ на MATLAB7 для решения задачи определения коэффициента абсорбции k и температурного профиля T_g по результатам активно-пассивной диагностики пламени горелки в предположении осевой симметрии пламени и параллельного сканирования его. Приведем численные иллюстрации решения этой задачи.

На рис. 7 представлены экспериментальные (measured) функции $I_{R,\mathrm{m}}(x)$ и $I_{g,\mathrm{m}}(x)$, а также $I_{T,\mathrm{m}}(x) = I_{R,\mathrm{m}}(x) - I_{g,\mathrm{m}}(x)$ на следующей сетке узлов:

$$x = 0;\ 0{,}4;\ 0{,}8;\ 1{,}2;\ 1{,}6;\ 2;\ 2{,}4;\ 2{,}8;\ 3{,}2;\ 3{,}6;\ 3{,}8 \text{ см} \tag{42}$$

при $\nu = 2271{,}496$ см$^{-1}$, $T_0 = 894{,}4$°C, $n = 12$, HAB = 12 мм (height above burner).

Измерения выполнены в Laboratory Risø DTU, Denmark в рамках совместного проекта [12].

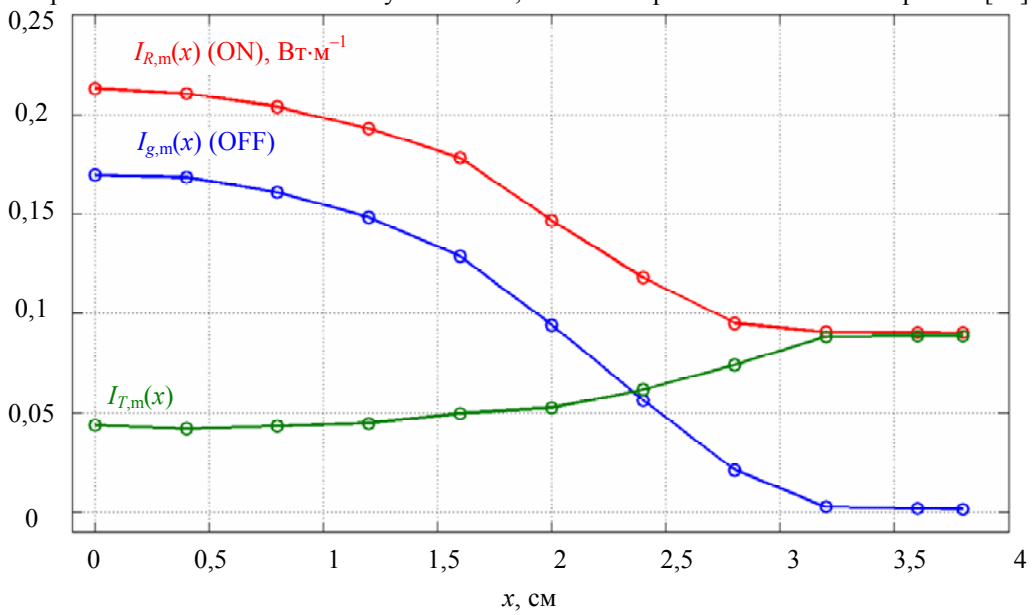


Рис. 7. Измеренные функции $I_{R,\mathrm{m}}(x)$, $I_{g,\mathrm{m}}(x)$ и $I_{T,\mathrm{m}}(x)$

На рис. 8 показан коэффициент абсорбции $k_\mathrm{m}(r)$ (пунктирная кривая), найденный в результате численного решения СИУ Абеля (9) обобщенным методом квадратур согласно (15) на сетке узлов (42) при $r_i = x_i$ на основе измеренной (measured) функции $I_{T,\mathrm{m}}(x)$.

Видим, что решение $k_\mathrm{m}(r)$ имеет значительные (нереальные) флуктуации. Это обусловлено грубостью шага дискретизации по x (другими словами, малостью n), а также наличием погрешностей измерения функций $I_{R,\mathrm{m}}(x)$ и $I_{g,\mathrm{m}}(x)$ (и, как следствие, $I_{T,\mathrm{m}}(x)$).

Рис. 8 показывает также резко пониженное значение $k_\mathrm{m}(0)$ (на оси симметрии пламени). Понижение значения $k(0)$ наблюдалось и в других работах, например, [4, 21], но в меньшей степени.

Мы добавили еще ограничение на решение $k_\mathrm{m}(r)$: определение (корректировка) такого значения $k_\mathrm{m}(0)$, при котором $k'_\mathrm{m}(0) = 0$ (равенство нулю производной при $r = 0$ следует из физических соображений). Численно такое значение $k_\mathrm{m}(0)$ можно получить на основе полинома Лагранжа 2-й степени, проходящего через точки $k_\mathrm{m}(0)$, $k_\mathrm{m}(r_2)$ и $k_\mathrm{m}(r_3)$, и формулы (2.65) работы [46, С. 121] при $f'(a) = a = 0$:

$$k_1 = \frac{r_3^2 k_2 - r_2^2 k_3}{(r_2 + r_3)(r_3 - r_2)}, \tag{43}$$

где $k_1 \equiv k_{\mathrm{m}}(r_1)$, $k_2 \equiv k_{\mathrm{m}}(r_2)$, $k_3 \equiv k_{\mathrm{m}}(r_3)$. В частном случае, когда $r_2 - r_1 = r_3 - r_2$, имеем $k_1 = (4k_2 - k_3)/3$. На рис. 8 точками отмечена часть кривой $k_{\mathrm{m}}(r)$ вблизи $r_1 = 0$ с найденным (скорректированным) согласно (43) значением $k_1 = k_{\mathrm{m}}(0)$. Видим, что скорректированное значение k_1 значительно отличается от нескорректированного и является более правдоподобным.

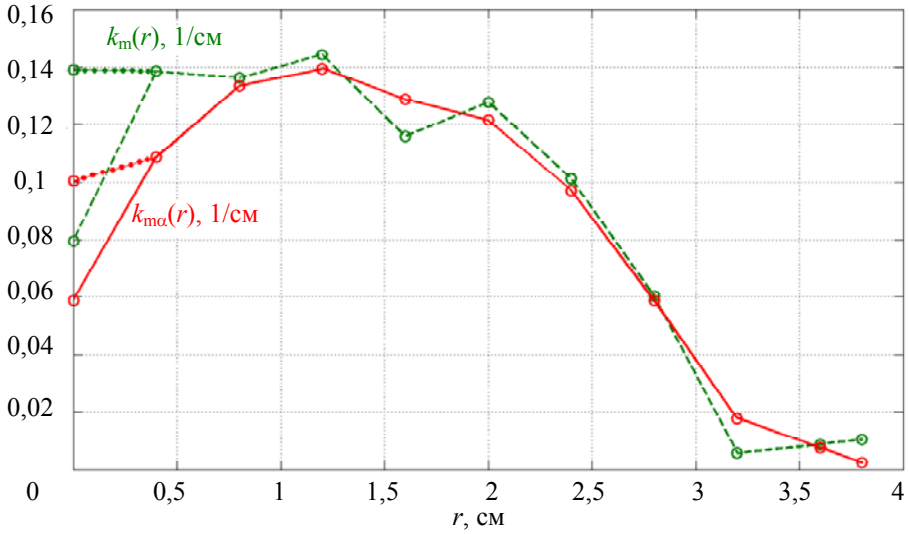


Рис. 8. Коэффициент абсорбции $k_{\mathrm{m}}(r)$ (без регуляризации) и $k_{\mathrm{m}\alpha}(r)$ (с регуляризацией)

На рис. 8 приведены также значения коэффициента абсорбции $k_{\mathrm{m}\alpha}(r)$ (непрерывная кривая), найденные в результате решения СЛАУ (30) методом регуляризации Тихонова согласно (33). При этом параметр регуляризации α выбран по принципу невязки согласно (35), причем оценка погрешности δ рассчитана по формуле (36). Получилось: $\delta = 0{,}037$, $\alpha = 10^{-0{,}09}$ (см. далее рис. 11). Отметим, что δ оценивается надежно, если в качестве «точных» значений I_T использовать $I_{T,\mathrm{s}}$ – значения I_T, полученные сглаживающим сплайном (см. рис. 9).

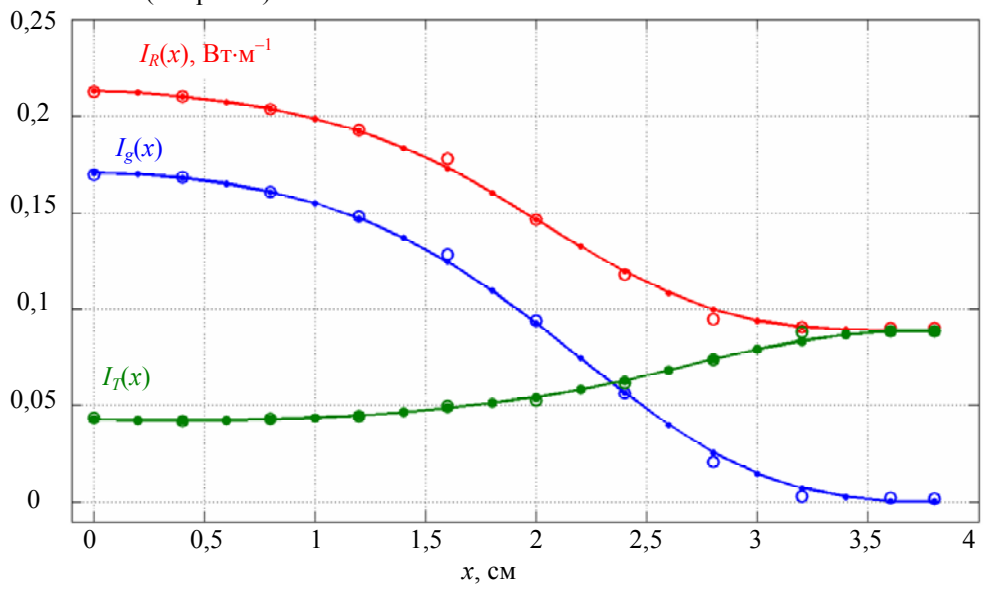


Рис. 9. Измеренные функции $I_{R,\mathrm{m}}(x)$, $I_{g,\mathrm{m}}(x)$ и $I_{T,\mathrm{m}}(x)$ (o);
узлы $x = 0(0,2)3{,}8$ кубических сглаживающих сплайнов (●); непрерывные кривые – сплайны

Рис. 8 показывает, что метод регуляризации Тихонова сам заметно сгладил флуктуации в $k(r)$, хотя при решении СЛАУ (33) использовались несглаженные I_T, а именно, $I_{T,\mathrm{m}}$. Точками отмечена часть кривой $k_{\mathrm{m}\alpha}(r)$ вблизи оси симметрии с корректированным согласно (43) значением $k_{\mathrm{m}\alpha}(0)$. Заключения о

полученном решении $k_{m\alpha}(r)$ (а также $k_m(r)$) будут сделаны дальше (после использования сглаживания экспериментальных данных).

Чтобы уменьшить шаг дискретизации по x, а также сгладить погрешности измерений функций $I_{R,m}(x)$ и $I_{g,m}(x)$ (и, как следствие, $I_{T,m}(x)$), был использован кубический сглаживающий сплайн. Вопросу о сглаживании данных посвящено много разработок. Использованы аппроксимирующие (сглаживающие) сплайны [7, 8, 10, 49], приближение линейной комбинацией полиномов [7, 41, 42], метод регрессии [44, 50, 51] и др. Например, в работе [51] использована процедура сглаживания экспериментальных зашумленных данных путем так называемой локально взвешенной регрессии (LOESS), в которой каждая точка сглаженных данных формируется посредством весового среднего некоторого числа соседних точек. Как отмечено в [22], эта процедура не устраняет прямо некорректность томографической задачи, но понижает неустойчивость решения.

В данной работе нами был использован кубический сглаживающий (аппроксимационный) сплайн [7, С. 42–86, 188–193; 10, С. 164; 44, P. 273; 49, С. 223]. На рис. 9 представлена аппроксимация функций $I_{R,m}(x)$, $I_{g,m}(x)$ и $I_{T,m}(x)$ кубическими сглаживающими сплайнами с помощью m-функции csaps.m (со сглаживающим параметром p = 0.97, что соответствует умеренному сглаживанию). При этом было введено дополнительное условие для всех трех функций: $I'(0) = 0$.

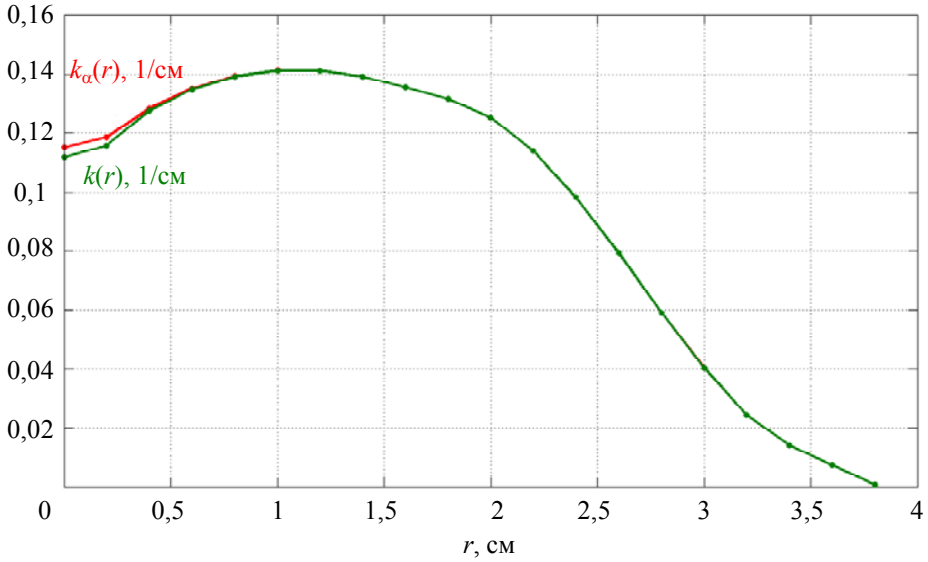


Рис. 10. Коэффициент абсорбции $k(r)$, полученный путем решения СИУ (9) обобщенным методом квадратур согласно (15), и $k_\alpha(r)$, полученный путем решения СЛАУ (33) методом регуляризации Тихонова

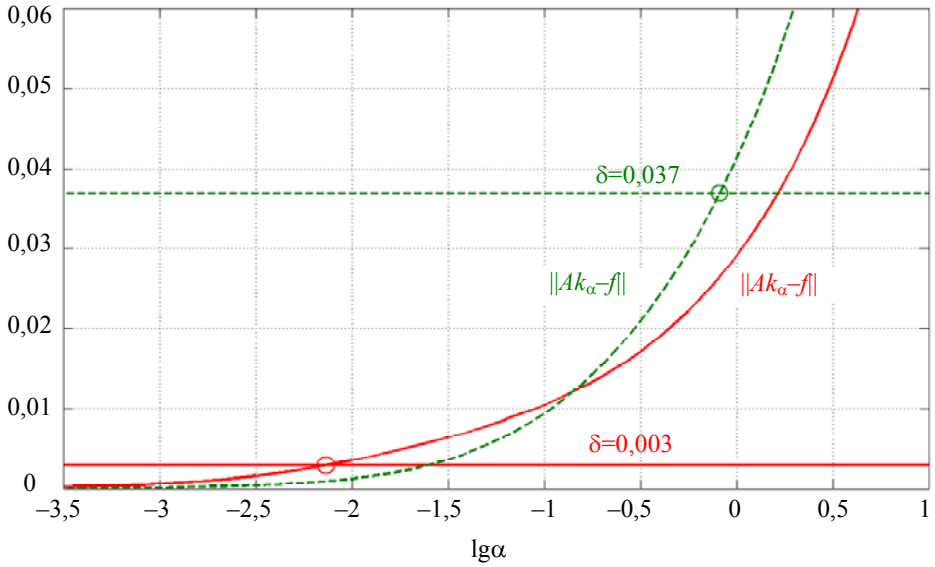


Рис. 11. Невязка $\|Ak_\alpha - f\|$ без сглаживания (пунктирная линия) и со сглаживанием (непрерывная линия) измеренной функции $I_{T,m}(x)$

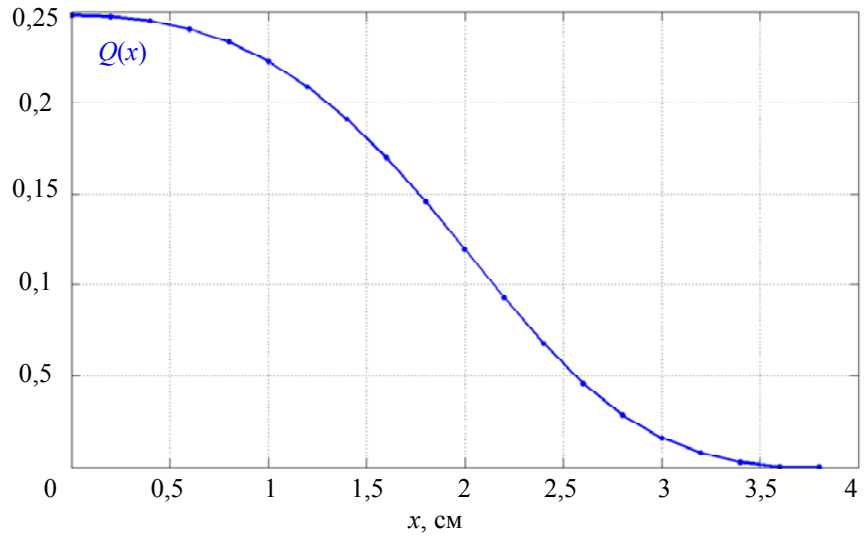


Рис. 12. Правая часть $Q(x)$, Вт/м

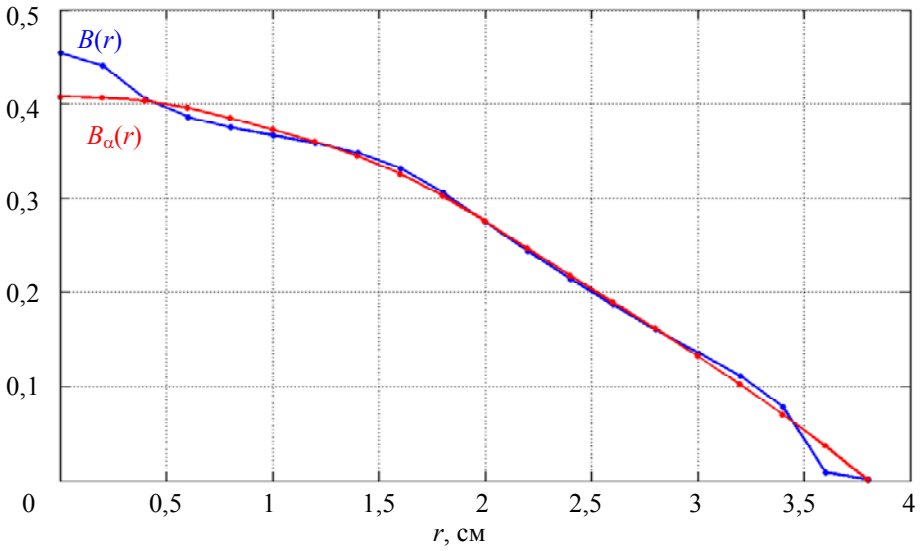


Рис. 13. Функция Планка $B(r)$ (без регуляризации) и $B_\alpha(r)$ (с регуляризацией), Вт/м

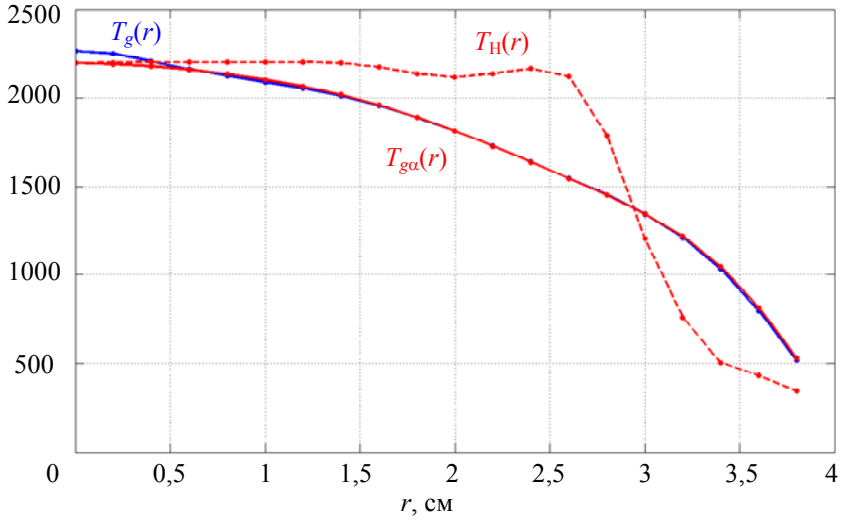


Рис. 14. Температурные профили $T_g(r)$ (без регуляризации), $T_{g\alpha}(r)$ (с регуляризацией) и $T_{\text{Н}}(r)$ (по методике CARS), К

Со сплайна были сняты сглаженные значения $I_T(x)$ в 20 узлах $x = 0(0,2)3,8$ и по ним снова решено ИУ (9) обобщенным методом квадратур согласно (15) (см. решение $k(r)$ на рис. 10), а также решена СЛАУ (30) методом регуляризации Тихонова согласно (33). Параметр регуляризации α выбран способом невязки ($\delta = 0,003$, $\alpha = 10^{-2,1}$) (решение $k_\alpha(r)$ – на рис. 10, а выполнение способа невязки – на рис. 11). При этом использованы ограничения: $k'(0) = k'_\alpha(0) = 0$.

Из рис. 10 видно следующее:

1. сглаживание сплайном измеренных функций $I_{R,\mathrm{m}}(x)$, $I_{g,\mathrm{m}}(x)$ и $I_{T,\mathrm{m}}(x)$ привело к (умеренному) сглаживанию решений $k(r)$ и $k_\alpha(r)$;
2. решения $k(r)$ (без регуляризации) и $k_\alpha(r)$ (с регуляризацией) получились практически одинаковыми.

Это говорит о том, что решение СИУ (9) можно получить, используя сглаживание измеренных функций и обобщенный метод квадратур без регуляризации, и при этом решение будет близким к регуляризованному решению.

Следующий шаг – определение функции Планка B и температурного профиля T_g. На рис. 12 представлена правая часть $Q(x)$ уравнения (20), рассчитанная согласно (22), (23).

Путем решения СИУ (20) обобщенным методом квадратур (согласно (28)) была найдена функция Планка $B(r)$ для среды (пламени горелки), представленная на рис. 13. Была найдена также функция Планка $B_\alpha(r)$ методом регуляризации Тихонова путем решения СЛАУ (41) (см. рис. 13). В заключение был рассчитан температурный профиль среды (осесимметричного пламени горелки) $T_g(r)$ по $B(r)$ (без регуляризации) и $T_{g\alpha}(r)$ по $B_\alpha(r)$ (с регуляризацией) согласно (29) – см. рис. 14. Видим, что результаты получились весьма близкими без регуляризации (но со сглаживанием и обобщенными квадратурами) и с регуляризацией, что подтверждает то, что задача решения сингулярных интегральных уравнений является умеренно некорректной и обладает свойством саморегуляризации.

На рис. 14 для сравнения приведен один из температурных профилей $T_{\mathrm{H}}(r)$ (Hartung's profile), полученных методом CARS [5] также для газовой горелки, но с несколько иными условиями. Видим заметные различия, но качественно картины похожие.

Заключение

По-новому изложена известная ИК методика определения коэффициента абсорбции k и функции Планка среды B (по которой можно определить температурный профиль T_g). Активно-пассивная диагностика позволяет получить две экспериментальные функции и два новых интегральных уравнения относительно k и B. Рассмотрен случай осевой симметрии (и параллельного сканирования), для которого справедливы сингулярные интегральные уравнения (СИУ) Абеля. Сформулирован (в новой редакции) обобщенный метод квадратур их решения относительно k и B. Выполнена обработка экспериментальных данных в двух вариантах – путем решения СИУ обобщенным методом квадратур и методом регуляризации Тихонова, причем без сглаживания и со сглаживанием экспериментальных данных. Эта обработка подтвердила, что СИУ обладает саморегуляризацией, задача его решения является умеренно некорректной, а использование обобщенного метода квадратур с предварительным сплайн-сглаживанием экспериментальных данных позволяет получить практически такие же результаты, как и методом регуляризации Тихонова.

В дальнейшем будут рассмотрены варианты веерного сканирования и изолиний в виде эллипсов.

Автор благодарен А. Фатееву и В. Евсееву за предоставленные экспериментальные данные (рис. 7) и за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-00442) и DTU, Denmark (Project No. 010246).

Литература

1. Porter R.W. Numerical solution for local emission coefficients in axisymmetric self-absorbed sources // SIAM Review. – 1964. – V. 6. – № 3. – P. 228–242.
2. Tourin R.H., Krakow B. Applicability of infrared emission and absorption spectra to determination of hot gas temperature profiles // Applied Optics. – 1965. – V. 4 – № 2. – P. 237–242.
3. Krakow B. Spectroscopic temperature profile measurements in inhomogeneous hot gases // Applied Optics. – 1966. – V. 5. – № 2. – P. 201–209.
4. Hall R.J. and Bonczyk P.A. Sooting flame thermometry using emission/absorption tomography // Applied Optics. – 1990. – V. 29. – № 31. – P. 4590–4598.

5. Hartung G., Hult J., Kaminski C.F. A flat flame burner for the calibration of laser thermometry techniques // Measur. Sci. Technol. – 2006. – V. 17. – P. 2485–2493.
6. Преображенский Н.Г., Пикалов В.В. Неустойчивые задачи диагностики плазмы. – Новосибирск: Наука, 1982. – 238 с.
7. Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. – Новосибирск: Наука, 1984. – 240 с.
8. Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. – Новосибирск: Наука, 1987. – 239 с.
9. Пикалов В.В., Мельникова Т.С. Томография плазмы (Низкотемпературная плазма, Т. 13). – Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1995. – 229 с.
10. Старков В.Н. Конструктивные методы вычислительной физики в задачах интерпретации. – Киев: Наук. думка, 2002. – 264 с.
11. Kästner W. et al. Application of evolutionary algorithms to the optimization of the flame position in coal-fired utility steam generators / E. Hüllermeier et al. (Eds.) // Proc. 13th Intern. Conf. IPMU 2010. – Part I. – Berlin: Springer, 2010. – V. 80. – P. 722–730.
12. Evseev V., Fateev A., Sizikov V., Clausen S., Nielsen K.L. On the development of methods and equipment for 2D-tomography in combustion // Report on Annual meeting of Danish Physical Society, 21–22 June 2011. – 32 p.
13. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов.энциклопедия, 1984. – 944 с.
14. Goody R.M., Yung Y.L. Atmospheric Radiation. Theoretical Basis. – 2nd ed. – New York–Oxford: Oxford University Press, 1989. – 536 p.
15. Huang B., Smith W.L., Huang H.-L., Menzel W.P. A hybrid iterative method for ATOVS temperature profile retrieval // Techn. Proc. 9th Intern. TOVS Study Conf., Igls, Austria, 20–26 Feb. 1997. – P. 177–187.
16. Doicu A., Trautmann T., Schreier F. Numerical Regularization for Atmospheric Inverse Problems. – Berlin: Springer, 2010. – 431 p.
17. Menzel W.P. Applications with Meteorological Satellites. Techn. Document WMO/TD № 1078. – Univ. Wisconsin, 2001. – 242 p.
18. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В., Иванов А.И., Swiderski W. Тепловая (инфракрасная) томография: терминология, основные процедуры и применение для неразрушающего контроля композиционных материалов // Дефектоскопия. – 2010. – № 3. – С. 3–15.
19. Зимняков Д.А., Тучин В.В. Оптическая томография тканей // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 10. – С. 849–867.
20. Ахметов В.Д., Фадеев Н.В. Инфракрасная томография времени жизни и диффузионной длины носителей заряда в слитках полупроводникового кремния // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35. – Вып. 1. – С. 40–47.
21. Daun K.J., Thomson K.A., Liu F., Smallwood G.J. Deconvolution of axisymmetric flame properties using Tikhonov regularization // Applied Optics. – 2006. – V. 45. – № 19. – P. 4638–4646.
22. Åkesson E.O., Daun K.J. Parameter selection methods for axisymmetric flame tomography through Tikhonov regularization // Applied Optics. – 2008. – V. 47. – № 3. – P. 407–416.
23. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. – М.: Мир, 1990. – 288 с.
24. Суинделл Б., Уэбб С. Рентгеновская трансмиссионная томография // Физика визуализации изображений в медицине. – М.: Мир, 1991. – Т. 1. – С. 138–173.
25. Гуров И.П., Сизиков В.С., Щекотин Д.С. Методы восстановления изображений в рентгеновской томографии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2003. – № 5 (11). – С. 97–104.
26. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современное состояние и перспективы развития томографии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 8 (42). – С. 3–13.
27. Сизиков В.С. Обратные прикладные задачи и MatLab. – СПб: Лань, 2011. – 256 с.
28. Симонов Е.Н. Физика визуализации изображений в рентгеновской компьютерной томографии. – Челябинск: Изд-во НИУ ЮУрГУ, 2013. – 550 с.
29. Fleck T., Jäger H., Obernberger I. Experimental verification of gas spectra calculated for high temperatures using the HITRAN/HITEMP database // J. Phys. D: Applied Physics. – 2002. – V. 35. – № 23. – P. 3138–3144.
30. Rothman L.S. et al. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 edition // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 1998. – V. 60. – № 5. – P. 665–710.
31. Radiative transfer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Radiative_transfer, свободный. Яз. англ. (дата обращения 10.08.2013).
32. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

33. Dasch C.J. One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods // Applied Optics. – 1992. – V. 31. – № 8. – P. 1146–1152.
34. Сизиков В.С., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Численное решение сингулярного интегрального уравнения Абеля обобщенным методом квадратур // Изв. вузов. Математика. – 2004. – № 8 (507). – С. 62–70.
35. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях. – М.: Наука, 1985. – 256 с.
36. Габдулхаев Б.Г. Прямые методы решения сингулярных интегральных уравнений первого рода. – Казань: Изд-во Казанс. ун-та, 1994. – 288 с.
37. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. – М.: ТОО «Янус», 1995. – 520 с.
38. Бойков И.В. Приближенные методы решения сингулярных интегральных уравнений. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 316 с.
39. Иванов В.В. Теория приближенных методов и ее применение к численному решению сингулярных интегральных уравнений. – Киев: Наук. думка, 1968. – 287 с.
40. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – 3-е изд. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
41. Minerbo G.N., Levy M.E. Inversion on Abel's integral equation by means of orthogonal polynomials // SIAM J. Num. Anal. – 1969. – V. 9. – № 4. – P. 598–616.
42. Косарев Е.Л. О численном решении интегрального уравнения Абеля // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. – 1973. – Т. 13. – № 6. – С. 1591–1596.
43. Deutsch M., Beniaminy I. Derivative-free inversion of Abel's integral equation // Appl. Phys. Lett. – 1982. – V. 41. – № 1. – P. 27–28.
44. Martinez W.L., Martinez A.R., Solka J.L. Exploratory Data Analysis with MATLAB. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 495 p.
45. Daun K.J. Infrared species limited data tomography through Tikhonov reconstruction // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2010. – V. 111. – № 1. – P. 105–115.
46. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – Киев: Наук. думка, 1986. – 544 с.
47. Engl H.W., Hanke M., Neubauer A. Regularization of Inverse Problems. – Dordrecht: Kluwer, 1996. – 328 p.
48. Hansen P.C. Discrete Inverse Problems: Insight and Algorithms. – Philadelphia: SIAM, 2010. – 213 p.
49. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений. – СПб: Политехника, 2001. – 240 с.
50. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
51. Cleveland W.S., Devlin S.J. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting // J. Amer. Stat. Assoc. – 1988. – V. 83. – № 403. – P. 596–610.

Сизиков Валерий Сергеевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, профессор; Институт международных образовательных программ при СПб ГПУ, профессор; доктор технических наук, профессор, sizikov2000@mail.ru

2 ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.787

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АМПЛИТУДЫ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА В СХЕМЕ ГОМОДИННОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ФАЗОВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

М.Ю. Плотников, А.В. Куликов, В.Е. Стригалев

Метод гомодинной демодуляции широко используется в интерферометрических волоконно-оптических датчиках. В работе приведены результаты моделирования зависимости амплитуды выходного сигнала этого метода от амплитуды измеряемого фазового сигнала и глубины фазовой модуляции несущего сигнала. Определена оптимальная глубина фазовой модуляции несущего сигнала, соответствующая максимальному значению амплитуды выходного сигнала, равная C = 2,373 рад. Впервые показан нелинейный характер амплитудной характеристики рассматриваемой схемы демодуляции, определяемый ограниченной полосой пропускания используемых фильтров низких частот. Математический анализ показал возможность увеличения линейного участка амплитудной характеристики путем расширения полосы пропускания фильтров низких частот, способствующего увеличению динамического диапазона значений входного сигнала. Согласно полученным в ходе моделирования результатам, для измеряемого фазового сигнала на частоте 500 Гц увеличение полосы пропускания фильтров низких частот с 500 Гц до 1500 Гц приводит к расширению линейного участка амплитудной характеристики с 1,1 рад до 2,9 рад, т.е. увеличению динамического диапазона значений входного сигнала на 8,42 дБ. Предложен способ математического расчета оптимальной полосы пропускания фильтров низких частот, обеспечивающей линейность амплитудной характеристики схемы демодуляции в заданном диапазоне входных воздействий.

Ключевые слова: волоконно-оптический интерферометрический датчик, гомодинная демодуляция, фазовая модуляция.

Введение

Рост числа разработок в сфере фазовых волоконно-оптических гироскопов, гидрофонов и других волоконных датчиков физических величин привел к распространению специальных цифровых методов обработки и демодуляции интерференционных сигналов с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [1].

В процессе реализации любого алгоритма обработки сигналов в цифровой форме необходимо учитывать не только последовательность преобразований, приводящих к конечному результату, но также и практические аспекты его реализации, такие как выбор частоты дискретизации, требования к амплитудно-частотным характеристикам используемых цифровых фильтров, влияние выбранных параметров схемы обработки на выходной сигнал, а также аппаратные возможности ПЛИС [2].

Настоящая работа посвящена моделированию и анализу аспектов практической реализации одного из наиболее распространенных на данный момент методов демодуляции сигналов для волоконно-оптических датчиков интерференционного типа – методу гомодинной демодуляции (phase-generated carrier homodyne demodulation technique) [3].

Исследование зависимости выходного сигнала от глубины фазовой модуляции несущего сигнала и амплитуды измеряемого фазового сигнала

С целью исследования зависимости амплитуды выходного сигнала схемы гомодинной демодуляции от различных параметров была реализована ее математическая модель в среде MATLAB.

Для построения цифровых фильтров была использована утилита среды MATLAB Filter Design and Analysis Tool, позволяющая генерировать цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой.

В модели использовались следующие постоянные параметры:

– длительность моделируемых сигналов – 1 с;
– частота фазовой модуляции несущего сигнала – 10 кГц;
– рабочий диапазон измеряемых частот – 1–500 Гц.

На рис. 1 представлены результаты моделирования рассматриваемой схемы демодуляции [3] для глубин фазовой модуляции несущего сигнала и измеряемого фазового сигнала C и D, изменяющихся в диапазоне 0– 2π рад с шагом 0,1 рад. При этом фильтры низких частот (ФНЧ) имели полосу пропускания 500 Гц, частота дискретизации составляла 100 кГц, размах полезного интерференционного сигнала B = 32766, частота фазовой модуляции несущего сигнала – 10 кГц, а частота измеряемого фазового сигнала – 500 Гц. Моделирование проводилось при нулевом положении рабочей точки ($\varphi_0 = 0$).

Согласно результатам моделирования, представленным на рис. 1, выходной сигнал схемы демодуляции нелинейно зависит как от глубины фазовой модуляции несущего сигнала, так и от амплитуды из-

меряемого фазового сигнала. Для более детального анализа полученных результатов моделирования рассмотрим отдельно зависимости амплитуды выходного сигнала для этих случаев.

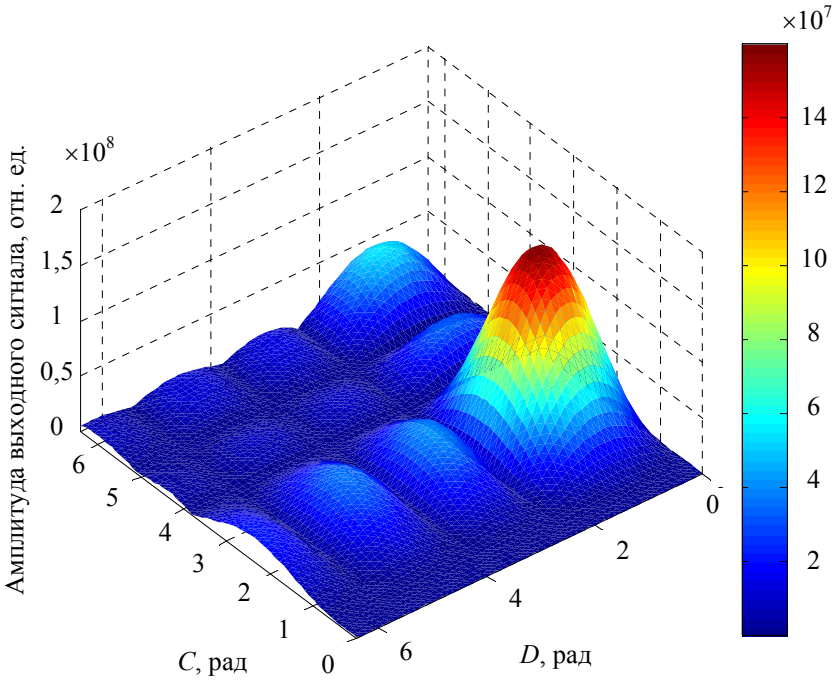


Рис. 1. Зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды измеряемого фазового сигнала и глубины фазовой модуляции несущего сигнала для полосы пропускания ФНЧ 500 Гц

Представленная на рис. 1 зависимость выходного сигнала от глубины фазовой модуляции несущего сигнала пропорциональна произведению $J_1(C)J_2(C)$, где $J_i(C)$ (i =1, 2) является функцией Бесселя первого рода i-го порядка от глубины фазовой модуляции несущего сигнала, что согласуется с результатами математического анализа [3, 4]. При этом оптимальным значением глубины фазовой модуляции несущего сигнала, соответствующим максимальному значению произведения $J_1(C)J_2(C)$, является величина $C \approx 2{,}373$ [4].

В работах [3–6] было показано, что зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды измеряемого фазового сигнала линейна, т.е. амплитуда выходного сигнала прямо пропорциональна величине входного воздействия. Однако полученные в ходе исследования результаты моделирования показали нелинейный характер зависимости амплитуды выходного сигнала от величины входного воздействия (рис. 1).

Для объяснения выявленной нелинейной зависимости амплитуды выходного сигнала от амплитуды измеряемого фазового сигнала рассмотрим более детально сигналы в схеме демодуляции непосредственно после фильтров низких частот [6]. В общем случае, раскладывая эти сигналы по функциям Бесселя, их можно представить как

$$S_1(t) = -BJ_1(C)\left(\cos\varphi_0(t)\left[2\cdot\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k\cdot J_{2k+1}(D)\cdot\cos\left[(2\cdot k+1)\cdot\omega\cdot t\right]\right]+\right.$$
$$\left.+\sin\varphi_0(t)\left[J_0(D)+2\cdot\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k\cdot J_{2k}(D)\cdot\cos(2\cdot k\cdot\omega\cdot t)\right]\right), \quad (1)$$

$$S_2(t) = -BJ_2(C)\left(\cos\varphi_0(t)\left[J_0(D)+2\cdot\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k\cdot J_{2k}(D)\cdot\cos(2\cdot k\cdot\omega\cdot t)\right]-\right.$$
$$\left.-\sin\varphi_0(t)\left[2\cdot\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k\cdot J_{2k+1}(D)\cdot\cos\left[(2\cdot k+1)\cdot\omega\cdot t\right]\right]\right). \quad (2)$$

Из формул (1)–(2) видно, что сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$ имеют бесконечный спектр, состоящий из гармоник, пропорциональных $J_n(D)$, $n \in [1, +\infty)$. Но на практике при реализации любого алгоритма демодуляции сигналов в цифровой форме обеспечить бесконечно большую полосу пропускания цифровых фильтров и схемы демодуляции не представляется возможным. Полоса пропускания будет ограничиваться в предельном случае частотой Найквиста – половиной частоты дискретизации схемы демодуля-

ции, которая, в свою очередь, будет определяться частотой дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Следовательно, неизбежно усечение части полезных гармоник сигналов в процессе их низкочастотной фильтрации.

Для точного определения характера зависимости амплитуды выходного сигнала схемы демодуляции от амплитуды измеряемого фазового сигнала необходимо проанализировать все дальнейшие преобразования над сигналами (1)–(2) согласно схеме [6] для нескольких случаев – присутствия в сигналах (1)–(2) только первой гармоники измеряемого сигнала, двух гармоник, трех и т.д. Эти случаи будут соответствовать различным полосам пропускания ФНЧ, равным соответственно одинарной, удвоенной, утроенной (и т.д.) частотам измеряемой фазовой модуляции.

Для упрощения вычислений будем считать остальные гармоники полностью отфильтрованными, а рабочую точку, изменение которой обычно гораздо медленней частоты измеряемых сигналов, постоянной величиной. Для простейшего случая, когда полоса пропускания фильтров низких частот равна частоте первой гармоники измеряемого сигнала, сигналы (1)–(2) можно записать так:

$$S_1(t) = -2BJ_1(C)J_1(D)\cos\omega t\cos\varphi_0 - BJ_1(C)J_0(D)\sin\varphi_0\,, \tag{3}$$

$$S_2(t) = 2BJ_2(C)J_1(D)\cos\omega t\sin\varphi_0 - BJ_2(C)J_0(D)\cos\varphi_0\,, \tag{4}$$

а производные сигналов (3) и (4) будут равны соответственно

$$\frac{\partial S_1(t)}{\partial t} = 2BJ_1(C)J_1(D)\omega\sin\omega t\cos\varphi_0\,, \tag{5}$$

$$\frac{\partial S_2(t)}{\partial t} = -2BJ_2(C)J_1(D)\omega\sin\omega t\sin\varphi_0\,. \tag{6}$$

В результате перекрестного перемножения сигналов (5) и (6) получаем:

$$S_1(t)\frac{\partial S_2(t)}{\partial t} = 4B^2J_1(C)J_2(C)J_1^2(D)\omega\sin\omega t\cos\omega t\sin\varphi_0\cos\varphi_0 + \\ +2B^2J_1(C)J_2(C)J_0(D)J_1(D)\omega\sin\omega t\cos^2\varphi_0\,, \tag{7}$$

$$S_2(t)\frac{\partial S_1(t)}{\partial t} = 4B^2J_1(C)J_2(C)J_1^2(D)\omega\sin\omega t\cos\omega t\sin\varphi_0\cos\varphi_0 - \\ -2B^2J_1(C)J_2(C)J_0(D)J_1(D)\omega\sin\omega t\sin^2\varphi_0\,. \tag{8}$$

Таким образом, после вычитания (7) из (8) получаем:

$$S_2(t)\frac{\partial S_1(t)}{\partial t} - S_1(t)\frac{\partial S_2(t)}{\partial t} = -2B^2J_1(C)J_2(C)J_0(D)J_1(D)\omega\sin\omega t\,, \tag{9}$$

а последующее интегрирование выражения (9) дает

$$S_{\text{вых}}(t) = 2B^2J_1(C)J_2(C)J_0(D)J_1(D)\cos\omega t\,. \tag{10}$$

Если произвести все математические преобразования над сигналами (1)–(2) согласно рассматриваемому алгоритму для случаев большей полосы пропускания ФНЧ, можно прийти к конечному выражению для зависимости амплитуды выходного сигнала на частоте измеряемого фазового сигнала от его амплитуды при ограниченной полосе пропускания ФНЧ, аналогичному выражению (10). Эту зависимость в общем виде можно представить как

$$S(t) = 2B^2J_1(C)J_2(C)\sum_{k=0}^{N-1}(2k+1)J_k(D)J_{k+1}(D)\cos\omega t\,, \tag{11}$$

где N равно количеству полезных гармоник измеряемого сигнала, укладывающихся в полосу пропускания ФНЧ.

Для подтверждения справедливости выражения (11) было произведено моделирование рассматриваемой схемы гомодинной демодуляции с различными полосами пропускания ФНЧ: 500 Гц, 1000 Гц и 1500 Гц. Результаты моделирования и соответствующие расчетные зависимости согласно формуле (11) приведены на рис. 2. Согласно рис. 2, расчетная зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды измеряемого фазового сигнала (11) соответствует результатам моделирования. Таким образом, выходной сигнал схемы демодуляции нелинейно зависит от амплитуды измеряемого фазового сигнала при пропускании ФНЧ только части полезных сигнальных гармоник измеряемого сигнала. Это может привести к неоднозначности определения величины входного измеряемого воздействия.

Выявленная зависимость выходного сигнала от амплитуды измеряемого фазового сигнала представляет большой интерес с точки зрения практической реализации рассматриваемого алгоритма в фазовых волоконно-оптических датчиках [7, 8], поскольку она определяет размеры линейного участка амплитудной характеристики схемы демодуляции в зависимости от амплитудно-частотных характеристик используемых цифровых фильтров. При увеличении полосы пропускания ФНЧ наблюдается уширение линейного участка амплитудной характеристики, что приводит к увеличению динамического диапазона

значений входного сигнала. Согласно рис. 2, для измеряемого фазового сигнала на частоте 500 Гц увеличение полосы пропускания используемых ФНЧ с 500 Гц до 1500 Гц приводит к расширению линейного участка амплитудной характеристики с 1,1 рад до 2,9 рад, т.е. увеличению динамического диапазона значений входного сигнала на 8,42 дБ.

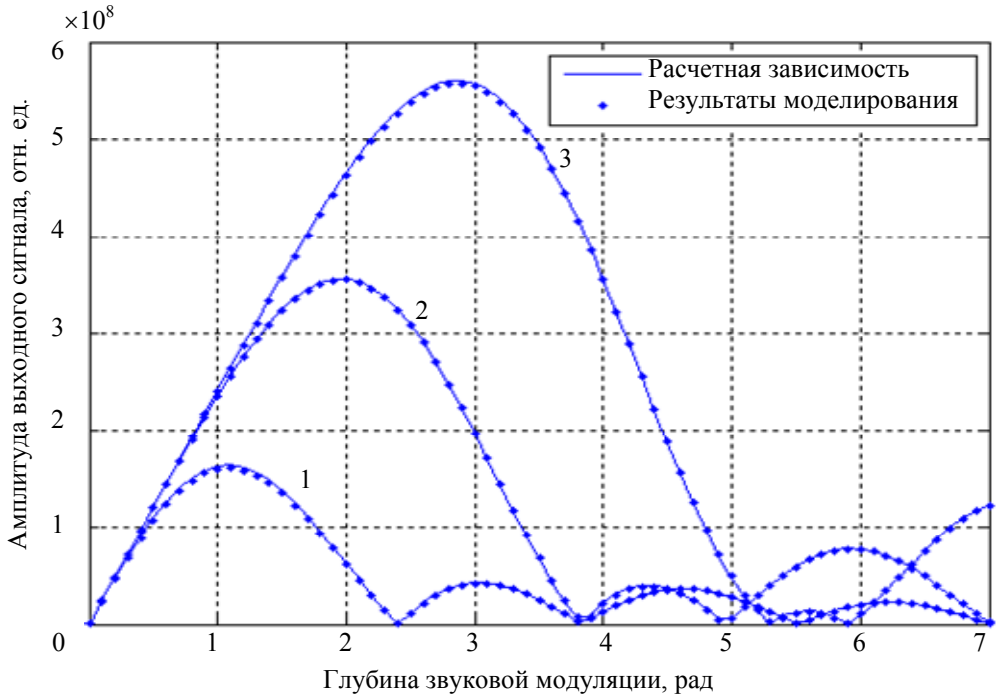


Рис. 2. Результаты моделирования и теоретического анализа зависимости амплитуды выходного сигнала от глубины измеряемой фазовой модуляции на частоте 500 Гц для полосы пропускания ФНЧ: 1 – 500 Гц; 2 – 1000 Гц; 3 – 1500 Гц

Полученные в ходе настоящего исследования результаты могут быть использованы при реализации рассматриваемого метода демодуляции в цифровой форме. Для работы на линейном участке амплитудной характеристики при построении цифровой схемы демодуляции сигналов необходимо, исходя из требований к динамическому диапазону фазового волоконно-оптического датчика, определить максимальное значение амплитуды измеряемой фазовой модуляции. Далее, с учетом нелинейной зависимости амплитуды выходного сигнала от амплитуды измеряемого фазового сигнала, определяемой выражением (11), следует рассчитать требуемую полосу пропускания ФНЧ. Согласно выбранной полосе пропускания ФНЧ определяются частоты модуляции несущего сигнала и дискретизации схемы демодуляции.

Заключение

В работе впервые было показано, что зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды измеряемого фазового сигнала имеет нелинейный характер из-за ограниченной полосы пропускания фильтров низких частот рассмотренной схемы гомодинной демодуляции. Нелинейный характер этой зависимости, определяемый формулой (11), может привести к неоднозначности определения величины входного измеряемого воздействия.

Исходя из полученных в ходе исследования результатов, выбор полосы пропускания фильтров низких частот при реализации схемы гомодинной демодуляции в цифровой форме должен осуществляться согласно требуемой линейности амплитудной характеристики и динамического диапазона значений входных сигналов схемы демодуляции.

Работа выполнена в НИУ ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

Литература

1. Shizhuo Yin, Paul B.Ruffin, Francis T.S.Yu. Fiber Optic Sensors. – 2nd ed. – Pennsylvania State University: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. – 477 p.
2. Lei Feng, Jun He, Jing-Yuan Duan, Fang Li, Yu-Liang Liu. Implementation of Phase Generated Carrier Technique for FBG Laser Sensor Multiplexed System Based on Compact RIO // Journal of Electronic Science and Technology of China. – 2008. – V. 6. – № 4. – P. 385–388.
3. Dandridge A., Tveten A.B. and Gialloronzi T.G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier // IEEE J. Quantum Electron. – 1982. – V. QE-18. – P. 1647–1653.

4. Asrul Izam Azmi, Ian Leung, Xiaobao Chen, Shaoling Zhou, Qing Zhu, Kan Gao, Paul Childs and Gangding Peng. Fiber Laser Based Hydrophone Systems // Photonic Sensors. – 2011. – V. 1. – № 3. – P. 210–221.
5. Артеев В.А., Варжель С.В., Куликов А.В. Распределенный волоконно-оптический датчик акустического давления на брэгговских решетках // Сборник трудов VII международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика–2011». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – С. 509–510.
6. Варжель С.В., Стригалев В.Е. Метод устранения влияния сигнала помехи на чувствительность приема гидроакустической антенны на основе волоконных брэгговских решеток // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 5–8.
7. Плотников М.Ю., Шарков И.А., Дейнека И.Г. Модификация схемы обработки данных фазового интерферометрического акустического датчика // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 5 (81). – С. 20–24.
8. Исламова Э.Ф., Куликов А.В., Плотников М.Ю. Компьютерное моделирование перекрестных помех в информационно-измерительном волоконно-оптическом приборе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 5 (87). – С. 59–62.

Плотников Михаил Юрьевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, plotnikov-michael@yandex.ru

Куликов Андрей Владимирович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, a.kulikov86@gmail.com

Стригалев Владимир Евгеньевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru

УДК 535.55

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПНЫХ ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ОТ ДИАМЕТРА НАМОТКИ

С.М. Аксарин, С.В. Архипов, С.В. Варжель, А.В. Куликов, В.Е. Стригалев

Разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить измерения линейных потерь в оптических волокнах методом вносимых потерь и *h*-параметра в анизотропных одномодовых волоконных световодах методом скрещенных поляризаторов. Проведено исследование величины линейных оптических потерь и *h*-параметра анизотропных одномодовых волоконных световодов в зависимости от диаметра намотки. В эксперименте диаметр намотки изменялся с шагом 2,5 мм в диапазоне диаметров 3–50 мм и с шагом 0,5 мм в диапазоне диаметров 3–10 мм. Исследования проведены для двулучепреломляющих оптических волокон с эллиптической напрягающей оболочкой с концентрацией легирования GeO_2 4, 12 и 18 мол.%. На основе анализа полученных результатов выработаны рекомендации по допустимой величине диаметра изгиба анизотропных одномодовых волоконных световодов, применяемых в волоконно-оптических датчиках интерферометрического типа. Измеренные параметры являются усредненными значениями для изогнутого участка, так как контроль равномерности распределения механического напряжения и пространственной ориентации эллиптической напрягающей оболочки у образцов в ходе настоящего эксперимента не осуществлялся.

Ключевые слова: анизотропный одномодовый волоконный световод, намотка, оптические потери, *h*-параметр.

Введение

В современных волоконно-оптических датчиках (ВОД) интерферометрического типа широко применяются анизотропные одномодовые волоконные световоды (АОВС) [1, 2]. Наиболее критичным к параметрам АОВС типом ВОД являются волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) [1, 3]. Разрабатываемые ВОГ повышенного класса точности создаются на основе АОВС с эллиптической напрягающей оболочкой [4]. При разработке конструкции ВОГ необходимо учитывать допустимые диаметры изгиба оптических волокон (ОВ). Изгиб АОВС приводит к увеличению линейных оптических потерь, взаимной перекачке энергии между ортогональными поляризационными модами и к увеличению шумовой составляющей в сигнале ВОГ соответственно.

Целью настоящей работы является исследование зависимости величины затухания и *h*-параметра АОВС от диаметра его намотки.

Исследование оптических потерь

В работе исследовались образцы АОВС, изготовленные по технологии [5, 6]. Параметры исследованных образцов АОВС указаны в таблице.

На основе информации, полученной при обзоре основных методик измерения, предложена оптическая схема измерения оптических потерь (рис. 1).

Наименования исследуемых образцов	ESC-4	ESC-SP13	ESC-SP16
Диаметр сердцевины, мкм	9	6	5
Диаметр модового поля, мкм	7,64	4,96	4,68
Концентрации GeO_2, мол.%	4	12	18
Линейные потери, дБ/км	0,5	2,5	4,65
Длина биений, мм	2,25	1,6	1,8
h-параметр, 1/м	$6\cdot10^{-6}$	$2\cdot10^{-4}$	$9\cdot10^{-5}$

Таблица. Паспортные данные исследуемых типов АОВС

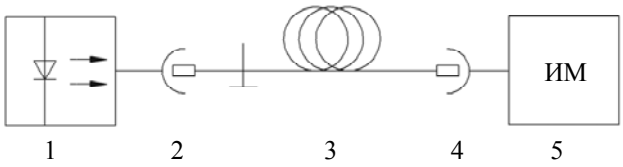


Рис. 1. Схема для измерения оптических потерь: 1 – источник излучения; 2, 4 – оптические разъемные коннекторы; 3 – исследуемый образец АОВС; 5 – измеритель оптической мощности (ИМ)

В эксперименте применен волоконный эрбиевый суперлюминесцентный источник оптического излучения (ОИ) (центральная длина волны 1,55 мкм, ширина спектра 25 нм). ОИ вводится через оптический коннектор FC-UPC в образец АОВС. Участок исследуемого АОВС наматывается на испытательную оснастку (рис. 2).

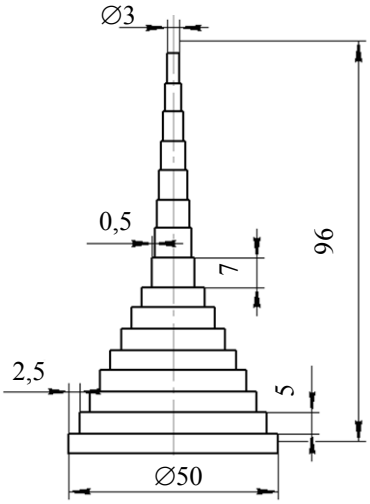


Рис. 2. Испытательная оснастка

Испытательная оснастка позволяет производить намотку волокна с диаметром намотки 3–50 мм. Шаг изменения радиуса составляет 2,5 мм при диаметрах 15–50 мм и 0,5 мм при диаметрах 3–10 мм. Измерения при большем или меньшем диаметрах намотки не проводились, так как при больших диаметрах изменение исследуемых параметров пренебрежимо малы, а при меньших происходит разрушение структуры волокна. Другой конец исследуемого волокна подсоединяется через оптический коннектор к измерителю оптической мощности, погрешность которого составляет ±0,15 дБ.

Для определения относительного изменения величины линейных оптических потерь было измерено значение мощности ОИ, проходящего через исследуемый образец, без его намотки на испытательную оснастку. Данные, полученные в результате измерений значений регистрируемой оптической мощности при различных диаметрах намотки образцов, позволили рассчитать линейные оптические потери исследуемых АОВС по формуле

$$\alpha = \left(10\lg\left(\frac{P_1}{P_0}\right)\right)\Big/ l_r$$

где α – затухание сигнала, дБ/м; l_r – длина наматываемого участка, м; P_1 и P_0 – поступающие на измеритель мощности после намотки и до нее соответственно, Вт.

На основе рассчитанных значений построены зависимости линейных потерь сигнала на намотанном участке от диаметра последнего. На рис. 3 приведены графики для каждого образца соответственно.

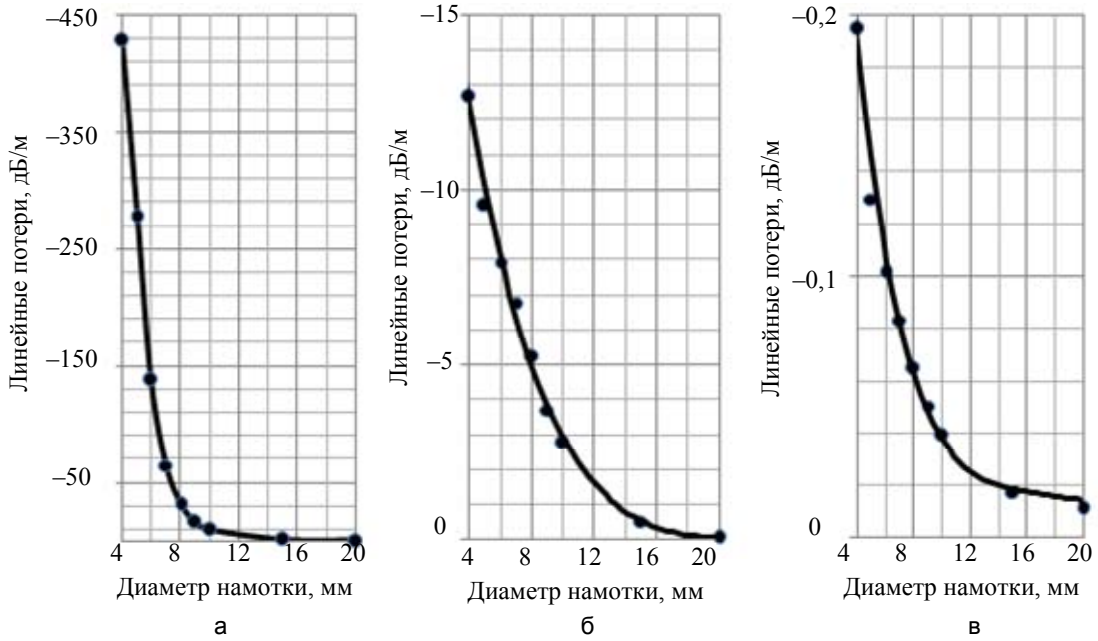


Рис. 3. Зависимости линейных потерь от диаметра намотки для образцов: ESC-4 (а); ESC-SP13 (б); ESC-SP16 (в)

Основным фактором, определяющим потери, является соотношение глубины проникновения поля в оболочку и диаметра намотки, т.е. чем меньше Δn (разница показателей преломления сердцевины и оболочки), тем дальше заходит в оболочку «экспоненциальный хвост», больше диаметр модового поля [7] и тем большее количество ОИ рассеивается в оболочке [8]. С этой теорией хорошо согласуются полученные зависимости линейных оптических потерь АОВС от диаметра их намотки.

Из таблицы видно, что диаметры сердцевин у исследуемых волокон разные, поэтому радиус кривизны изгиба области локализации ОИ различается, в результате эффект фотоупругости сильнее выражен в волокне с большей сердцевиной – ESC-4.

Исследование *h*-параметра

Для измерения *h*-параметра АОВС была выбрана методика скрещенных поляризаторов [9, 10]. На рис. 4 представлена оптическая схема для измерения *h*-параметра АОВС в зависимости от диаметра намотки.

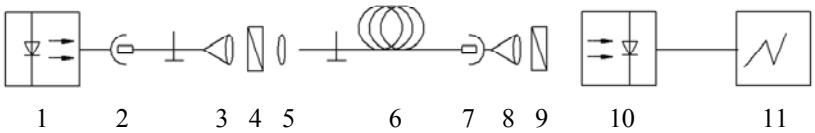


Рис. 4. Схема для измерения *h*-параметра: 1 – источник излучения; 2, 7 – оптические разъемные коннекторы; 3, 8 – коллиматоры; 4 – поляризатор; 5 – объектив; 6 – исследуемый образец АОВС со сколотым торцом; 9 – анализатор; 10 – фотоприемник; 11 – осциллограф

ОИ от эрбиевого суперлюминесцентного источника ОИ поступает в одномодовое волокно, проходит через коллиматор на поляризатор и через объектив попадает на входной торец исследуемого образца АОВС. Входной торец АОВС устанавливается в зажим, фиксирующий и предотвращающий вращение ОВ. Положение ОВ относительно фокуса объектива регулируется с помощью микропозиционера. ОИ распространяется по участку волокна, намотанному на испытательную оснастку, и с выходного торца АОВС, оконцованного коннектором типа FC-UPC, попадает на коллиматор, а из него на анализатор. Из анализатора ОИ попадает на фотоприемник. Выходной сигнал фотоприемника регистрируется осциллографом.

Изменение напряжения сигнала, регистрируемого с фотоприемника, прямо пропорционально изменению интенсивности ОИ, поступающего на его вход: $\Delta U_{пр} \sim \Delta I$. Формула, выражающая значение *h*-параметра [1], имеет вид

$$\frac{dI_c}{dL} = hI_p \qquad (1)$$

где I_p – интенсивность моды с основной входящей поляризацией; I_c – интенсивность перекрестной моды; h – *h*-параметр; L – длина участка ОВ.

Учитывая (1), получаем

$$h = \psi / L ,$$

где ψ – экстинкция,

$$\psi = \frac{U_c - U_{\text{см}}}{U_c + U_p - 2U_{\text{см}}} .$$

Здесь $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения фотоприемника, U_p – напряжение, при котором на фотоприемник попадает только возбуждаемая поляризационная мода, а U_c – напряжение, регистрируемое при взаимном расположении поляризаторов, при котором на фотоприемник попадает только поляризационная мода, ортогональная возбуждаемой.

Определение зависимости h-параметра от диаметра намотки АОВС производилось по формуле

$$h_{\text{нам}} = \left(\frac{U_c - U_{\text{см}}}{U_c + U_p - 2U_{\text{см}}} - \psi_\infty \right) \frac{1}{l_{\text{нам}}} ,$$

где ψ_∞ – экстинкция образца без намотки; $l_{\text{нам}}$ – длина намотанного участка.

На рис. 5 показаны полученные зависимости.

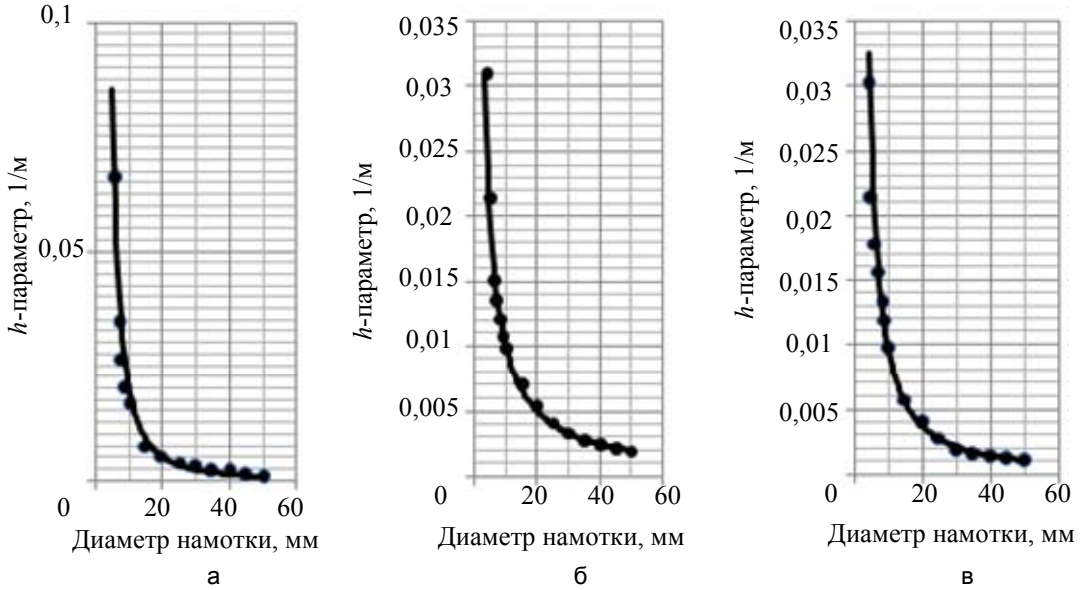


Рис. 5. Графики зависимостей величины h-параметра от диаметра намотки образцов: ESC-4 (а); ESC-SP13 (б); ESC-SP16 (в)

При уменьшении радиуса кривизны изгиба волокна увеличивается влияние эффекта фотоупругости [2]. В результате появления ярко выраженных флуктуаций показателя преломления на длине наматываемого участка волокна наблюдается повышенная перекачка ОИ из основной поляризационной моды в ортогональную. Эти преобразования приводят к увеличению значения h-параметра АОВС. С этим выводом хорошо согласуются полученные зависимости. Измеренные параметры являются усредненными значениями для намотанного участка, так как контроль равномерности распределения механического напряжения и пространственная ориентация эллиптической напрягающей оболочки у образцов в ходе настоящего эксперимента не осуществлялся.

Заключение

Проведено исследование зависимости линейных оптических потерь и h-параметра трех образцов анизотропных одномодовых волоконных световодов от радиуса намотки. Наименьшими значениями оптических потерь и h-параметра в намотанном состоянии обладает оптическое волокно ESC-SP16. Наиболее существенная разница исследуемых параметров наблюдается при диаметрах намотки меньше 40 мм, на основе чего выработаны рекомендации по допустимым диаметрам изгиба исследуемых анизотропных одномодовых волоконных световодов для волоконно-оптических датчиков интерферометрического типа. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего исследования путей улучшения характеристик анизотропных одномодовых волоконных световодов, а также для расчета конструкций волоконно-оптических датчиков, в которых применяются исследованные виды оптических волокон.

Работа выполнена в НИУ ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

Литература

1. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. – London: Artech House, 1992. – 313 p.
2. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
3. Мешковский И.К., Унтилов А.А., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л. Качество намотки чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 7. – С. 76–80.
4. Meshkovskii I.K., Strigalev V.Ye., Deineka G.B., Peshekhonov V.G., Volynskii D.V., Untilov A.A. Three Axis Fiber Optic Gyroscope: Development and Test Results // Gyroscopy and Navigation. – 2011. – V. 2. – № 4. – P. 208–213.
5. Eron'yan M.A. Method of fabricating fiber lightguides that maintain the polarization of the radiation // Russian Patent. – 2000. – № 2. – P. 155–359.
6. Bureev S.V., Dukel'skii K.V., Eron'yan M.A., Komarov A.V., Levit L.G., Khokhlov A.V., Zlobin P.A., Strakhov V.I. Processing large blanks of anisotropic single-mode lightguides with elliptical cladding // J. Opt. Technol. – 2007. – V. 74. – № 4. – P. 297–298.
7. Варламов А.В., Куликов А.В., Стригалев В.Е., Варжель С.В., Аксарин С.М. Определение оптических потерь при стыковке световодов с различным диаметром модового поля // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 23–26.
8. Воронин В.Г., Долгалева К.П., Наний О.Е., Туркин А.Н., Щербаткин Д.Д., Хлыстов В.И. Интегральные потери в элементах волоконно-оптических линий связи. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2000. – 22 с.
9. Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Медведев А.В. Интерференционный метод измерения коэффициента экстинкции двулучепреломляющих волоконных световодов // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – № 5. – С. 102–103.
10. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. – М.: Мир, 1987. – 616 с.

Аксарин Станислав Михайлович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, oskar2002@list.ru

Архипов Сергей Владимирович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, thinkingcreature@yandex.ru

Варжель Сергей Владимирович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник, vsv187@gmail.com

Куликов Андрей Владимирович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, a.kulikov86@gmail.com

Стригалев Владимир Евгеньевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru

УДК 681.787

СТАБИЛИЗАЦИЯ ФАЗОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛА ФАЗОВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

А.С. Алейник, И.Г. Дейнека, А.А. Макаренко, М.В. Мехреньгин, В.Е. Стригалев

Проведено программное моделирование фазовой характеристики волоконно-оптического гироскопа в пакете прикладных программ MATLAB. Описан механизм искажения фазовой характеристики волоконно-оптического гироскопа, который заключается в изменении скорости выхода гироскопа на режим, что, в свою очередь, может быть вызвано изменением оптической мощности в системе при изменении температуры окружающей среды. Проведен поиск и теоретический анализ существующих методов стабилизации фазовой характеристики – использования фильтра с бесконечной фазовой характеристикой и программного управления коэффициентом усиления фотоприемного устройства. Установлено, что имеющиеся методы не решают поставленной задачи, так как не устраняют первопричину возникновения искажений фазовой характеристики сигнала волоконно-оптического датчика. Разработан новый метод стабилизации фазовой характеристики сигнала фазового волоконно-оптического датчика. Метод основан на введении нормировки разностей показаний аналого-цифрового преобразователя, несущих полезный сигнал о скорости вращения. Проведено экспериментальное исследование задержек в приборе БИМ-3 при изменении температуры в диапазоне 25–29ºС. Результаты исследования показали уменьшение максимальной величины задержки в 4 раза и уменьшение диапазона изменения величины задержки с 280 до 7 мкс при введении нормировки.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, фазовая характеристика, фильтр с бесконечной импульсной характеристикой, нормировка.

Введение

Одним из важнейших направлений развития современного приборостроения в области систем навигации, ориентации и управления подвижными объектами является совершенствование существующих и создание новых датчиков первичной информации, приборов и систем на их основе. При этом наиболее перспективными являются приборы, построенные на базе волоконно-оптических датчиков [1].

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) представляет собой датчик угловой скорости в инерциальном пространстве, действие которого основано на эффекте Саньяка.

Волоконно-оптические гироскопы по сравнению с механическими являются более надежными, так как в составе ВОГ отсутствуют какие-либо подвижные элементы, вследствие чего они могут использоваться в более жестких условиях эксплуатации. Также благодаря структуре статического типа появляется еще ряд достоинств: устойчивость к ускорению, простота конструкции, короткое время запуска и низкая потребляемая мощность. Потенциальная точность такого ВОГ составляет $7 \cdot 10^{-4}$ °/ч [2].

Описание проблемы

Основной сложностью на сегодня является то, что при кажущейся простоте прибора и высокой чувствительности его к угловой скорости вращения он чрезвычайно подвержен различным внешним воздействиям, что приводит к паразитным дрейфам и, как следствие, к снижению точности измерений. Примерами таких воздействий являются нестационарные температурные поля [3], акустические шумы и вибрации, переменные электрические и магнитные поля [4].

Одним из следствий воздействия случайных тепловых полей на ВОГ является искажение фазовой характеристики. Фазовая характеристика ВОГ, полученная в результате программного моделирования в пакете прикладных программ MATLAB, представлена на рис. 1.

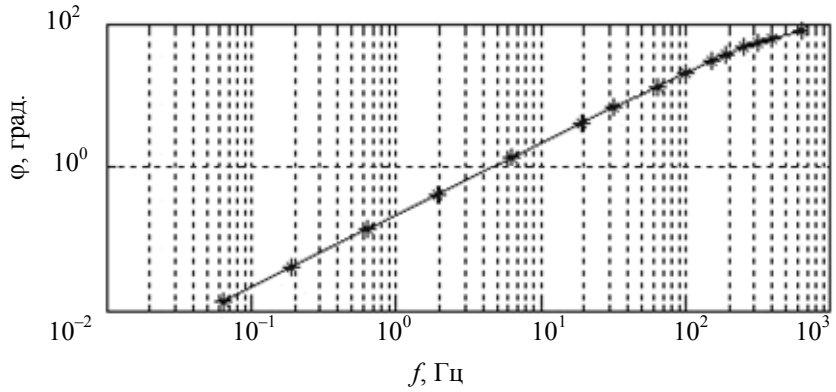


Рис. 1. Фазовая характеристика ВОГ

Рассмотрим механизм возникновения задержки по фазе. Прямоугольная смещающая модуляция в случае ВОГ является наиболее распространенной. Принципиальная схема работы данного типа модуляции показана на рис. 2 [2].

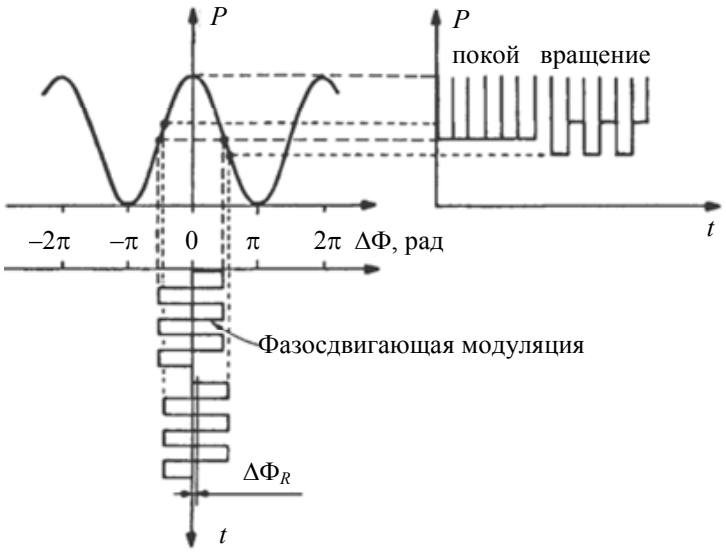


Рис. 2. Прямоугольная смещающая модуляция [2]

Этот тип модуляции–демодуляции применяется как оптимальная смещающая техника, потому что он создает синусоидальный отклик со стабильным смещением [2]. Вид модулированного отклика ВОГ представлен на рис. 3.

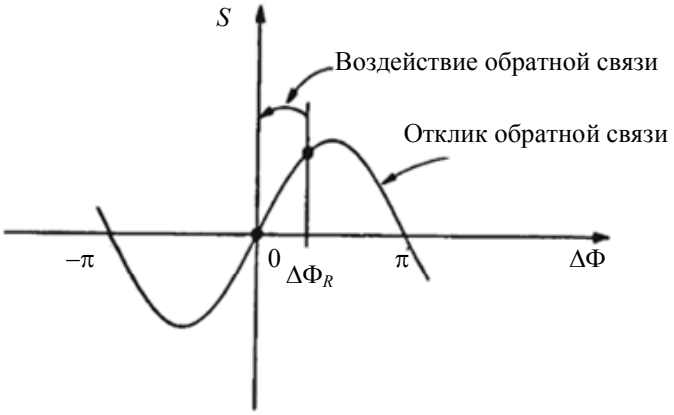


Рис. 3. Синусоидальный отклик ВОГ [2]

В случае отсутствия первой обратной связи выходной сигнал ВОГ является нелинейным, так как описывается функцией синуса. По этой причине для расширения динамического диапазона и увеличения точности прибора предпочтительнее использовать ВОГ с замкнутой петлей обратной связи. Также отклик ВОГ зависит от чувствительности фотодетектора, оптической мощности на фотоприемнике и средней длины волны источника излучения.

Принцип работы ВОГ с замкнутой петлей обратной связи представлен на рис. 3. При использовании схемы с замкнутой петлей обратной связи обеспечивается линейный отклик с хорошей стабильностью. При этом скорость работы обратной связи зависит от добавки к величине подставки. Добавка вычисляется как разность между двумя соседними показаниями фотоприемника

$$\Delta = U_n - U_{n-1}, \quad (1)$$

где U_n – текущая величина напряжения на выходе фотоприемника, U_{n-1} – предыдущая величина напряжения на выходе фотоприемника. В свою очередь, напряжение на выходе фотоприемника выражается формулой

$$U_{фп} = P\eta R, \quad (2)$$

где P – мощность, детектируемая на фотоприемнике; η – чувствительность фотоприемника; R – сопротивление трансимпедансного усилителя [5]. Если выразить мощность на фотоприемнике через оптическую мощность одного из интерферирующих пучков, то получим

$$U_{фп} = 4P_0\cos(\Delta\varphi_S + \Delta\varphi_M)\eta R, \quad (3)$$

где P_0 – оптическая мощность одного из интерферирующих пучков; $\Delta\varphi_S$ – разность фаз Саньяка; $\Delta\varphi_M$ – модулирующая разность фаз [5]. Таким образом, изменение оптической мощности в схеме, которое, в том числе, может быть вызвано изменением температуры, приводит к изменению напряжения, детектируемого на фотоприемнике. Изменение напряжения на выходе фотоприемника приводит к изменению величины добавки к подставке первой обратной связи, исходя из формулы (1). Скорость изменения величины подставки, которая зависит от величины добавки, влияет на скорость работы обратной связи и скорость выхода гироскопа на режим [6]. Это приводит к искажению фазовой характеристики ВОГ.

Стоит пояснить, что изменение фазовой характеристики ВОГ при использовании одного гироскопа приводит к изменению передаточной характеристики и небольшому изменению величины ошибки от температуры. Однако применение одного гироскопа не имеет практической ценности. Исходя из этого, применяются системы из трех гироскопов для измерения угловой скорости движения объекта в каждой из трех плоскостей пространства [7].

При использовании системы из трех ВОГ изменение фазовой характеристики одного из приборов приводит к рассогласованию показаний ВОГ в составе системы друг относительно друга, т.е. к ошибке по координате. Величина этого рассогласования может достигать нескольких сотен микросекунд и серьезно влиять на точность итогового отклика прибора.

Для решения этой проблемы необходимо свести разности выходных задержек всех ВОГ, используемых в системе, к минимуму.

Способы решения проблемы искажения фазовой характеристики

Изначально было предложено два варианта решения поставленной задачи:

– применение фильтра с бесконечной импульсной характеристикой для изменения фазовой характеристики каждого из гироскопов;

– реализация программного управления коэффициентом усиления фотоприемного устройства.

Применение цифрового фильтра с бесконечной импульсной характеристикой для обеспечения временного фазового согласования ВОГ заключается во внесении различных дополнительных задержек в показания каждого из гироскопов. Разработанный фильтр использует механизм фильтрации, который можно описать формулой

$$Y_{\text{вых}} = x(i)K_1 + x(i-1)K_2 + y(i-1)K_3, \quad (4)$$

где $Y_{\text{вых}}$ – выходной сигнал (величина, принимаемая далее за подставку); x – входной сигнал (реальная величина подставки); K_1, K_2 – коэффициенты входного сигнала; K_3 – коэффициент обратной связи.

Данный метод позволяет корректировать фазовое рассогласование до определенных величин задержек (порядка 10 мкс), т.е. существует лишь некоторый диапазон задержек между показаниями ВОГ, в котором данный метод работает успешно. Кроме того, такой подход не устраняет самой причины появления фазового рассогласования, поэтому при изменении температуры эффективность метода резко снижается, и коэффициенты фильтра приходится изменять.

Как было описано выше, величина сдвига фазовой характеристики зависит от изменения оптической мощности, поэтому второй метод стабилизации фазовой характеристики гироскопа основан на программном управлении коэффициентом усиления фотоприемного устройства. В результате использования данной техники можно уравнять оптические мощности в каждом из гироскопов и в дальнейшем установить одинаковые коэффициенты первой обратной связи. Эти действия приводят к временному фазовому согласованию ВОГ в составе изделия. К сожалению, результат работы этого метода также зависит от изменения температуры внешней среды. При этом возникает нестабильность в работе гироскопа, и данный метод также не приводит к решению поставленной задачи.

Стабилизация фазовой характеристики с помощью нормировки

Известно, что изначально величина подставки в схеме с первой обратной связью рассчитывалась в цифровом устройстве обработки как разность между двумя соседними показаниями аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Как упоминалось выше, точность такого способа обработки напрямую зависит от изменения величины оптической мощности излучения под действием температуры. В связи с этим созданный метод стабилизации фазовой характеристики сигнала ВОГ заключается в нормировке значений разницы соседних показаний АЦП, несущих полезный сигнал о скорости вращения. Нормировка выполняется в соответствии с выражением

$$\Delta = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n + x_{n-1}}, \quad (5)$$

где x_n – текущее показание АЦП; x_{n-1} – предыдущее показание АЦП;

Был проведен ряд измерений с целью доказать работоспособность данного метода на практике, используя реальную модель гироскопа. На первом этапе использовалась схема обработки без системы нормировки. Результаты этих испытаний представлены на рис. 4. График (рис. 4, а) отражает зависимость температуры внешней среды от времени. Графики (рис. 4, б, в) отображают изменение величины задержки между показаниями гироскопов x–z и y–z соответственно в зависимости от времени.

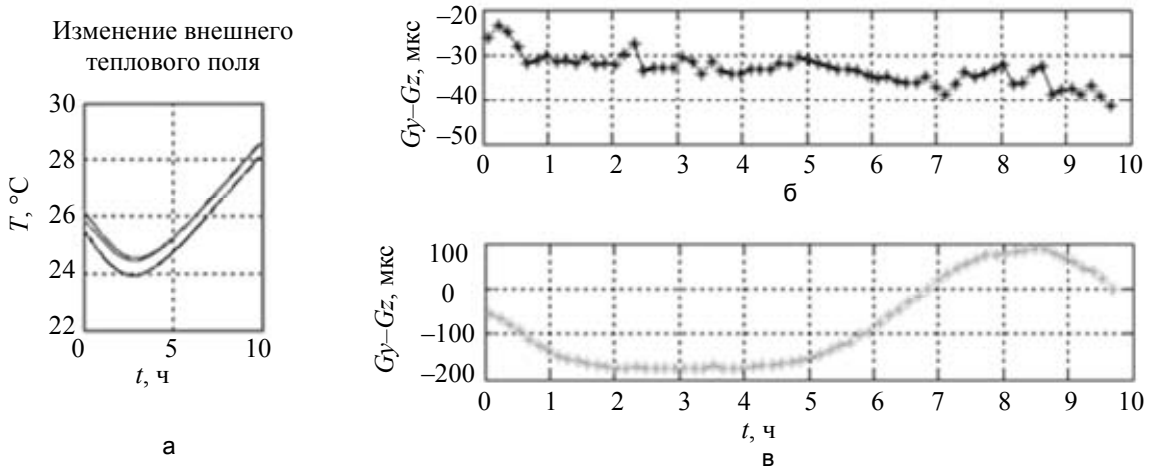


Рис. 4. Фазовые задержки ВОГ в составе системы до введения нормировки: показания с датчиков температуры в ВОГ X ,Y , Z (а); фазовая задержка между показаниями ВОГ X и Z, где Gx – показания гироскопа X, Gy – показания гироскопа Y (б); фазовая задержка между показаниями ВОГ X и Z, где Gx – показания гироскопа X, Gz – показания гироскопа Z (в)

Из графиков (рис. 4, б, в) видно, что задержка изменяется в пределах от –180 до 100 мкс, т.е. в большом диапазоне – порядка 280 мкс.

Далее в систему цифровой обработки сигнала была добавлена разработанная система нормировки, и проводились повторные испытания, результаты которых представлены на рис. 5. Данные эксперимента показывают, что максимальная величина задержки в системе составила 44 мкс по абсолютному значению. Иначе говоря, значение максимальной задержки уменьшилось более чем в 4 раза. Также стоит отметить, что диапазон, в котором изменяется величина задержки, составил всего 6–7 мкс, что очень мало в сравнении с изначальными 280 мкс. Все эти факты свидетельствуют о выполнении поставленной задачи.

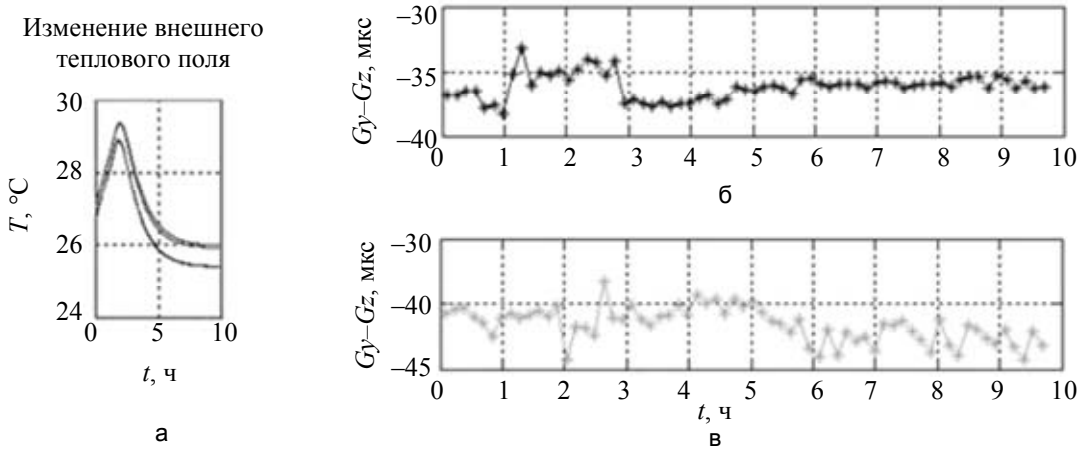


Рис. 5. Фазовые задержки ВОГ в составе системы после введения нормировки: показания с датчиков температуры в ВОГ *X* ,*Y* , *Z* (а); фазовая задержка между показаниями ВОГ *X* и *Z*, где *Gx* – показания гироскопа *X*, *Gy* – показания гироскопа *Y* (б); фазовая задержка между показаниями ВОГ *X* и *Z*, где *Gx* – показания гироскопа *X*, *Gz* – показания гироскопа *Z* (в)

Заключение

В результате работы был создан и программно реализован метод стабилизации фазовой характеристики волоконно-оптического гироскопа и временного фазового согласования волоконно-оптических гироскопов в составе прибора. В ходе экспериментальной проверки предложенного метода была доказана его работоспособность на примере исследования задержек в приборе БИМ-3 при изменении температуры в диапазоне 25–29ºС. При этом максимальная величина задержки уменьшилась в 4 раза, а диапазон изменения задержки от температуры уменьшился с 280 до 7 мкс. В настоящее время разработанный метод успешно используется в плате обработки сигналов волоконно-оптического гироскопа.

Работа выполнена в НИУ ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

Литература

1. Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T.S.Yu. Fiber Optic Sensors. – 2nd ed. – Pennsylvania State University: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. – 477 p.
2. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. – Artech House, 1993. – 314 p.
3. Мешковский И.К., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л. Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 2. – С. 47–51.
4. Мешковский И.К., Олехнович Р.О., Тараканов С.А. Изучение изменения сигнала волоконно-оптического гироскопа, вызванного изменением температуры окружающей среды и внешним магнитным полем // Научно-технический вестник СПб ГУИТМО. – 2008. – № 4 (49). – С. 164–174.
5. Lefevre H.C. Ultimate-Performance Fiber-Optic Gyroscope: A Reatity // 16th OptoElectronics and Communications Conference, Kaohsiung, Taiwan. – 2011. – P. 75–78.
6. Драницына Е.В., Егоров Д.А. Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля // Навигация и управление движением: Материалы докладов XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2012. – С. 94–100.
7. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.

Алейник Артем Сергеевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, artemal@rambler.ru

Дейнека Иван Геннадьевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vanodnk@gmail.com

Макаренко Александр Александрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a_makarenko@mail.ru

Мехреньгин Михаил Викторович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, mehrengin@gmail.com

Стригалев Владимир Евгеньевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru

УДК 528.526.6

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА НА ПОКАЗАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

И.А. Шарков, А.В. Рупасов, В.Е. Стригалев, С.А. Волковский

Рассматривается вопрос влияния температурной нестабильности источника излучения на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа, построенного по схеме с обратной связью. Известно, что нагрев источника в основном приводит к изменению величины масштабного коэффициента. В работе произведен расчет влияния величины центральной длины волны эрбиевого широкополосного источника на величину масштабного коэффициента и сигнал волоконно-оптического гироскопа. При скорости вращения прибора 13 °/ч (скорость вращения Земли) ошибка определения скорости должна составить $d\Omega_{ош}=7{,}2\cdot10^{-5}$(°/ч) $\cdot$К$^{-1}$, но уже при скорости вращения 1°/ч ошибка составит $d\Omega_{ош}=1{,}9\cdot10^{-2}$(°/ч) $\cdot$К$^{-1}$. Полученный результат сравнен с экспериментальными данными, полученными при нагреве источника в термокамере при детектировании скорости вращения Земли. При этом ошибка определения скорости составила $d\Omega_{ош}=3\cdot10^{-3}$(°/ч) $\cdot$К$^{-1}$, т.е. значительно больше рассчитанной ранее для масштабного коэффициента. Дополнительный эксперимент с переворотом плоскости гироскопа на 180° показал, что обнаруженная ошибка связана с дрейфом нуля, а не с изменением масштабного коэффициента. Очевидно, что возникающая при нагреве источника излучения ошибка показаний волоконно-оптического гироскопа (из-за дрейфа нуля и изменения масштабного коэффициента) не позволяет достичь необходимой точности волоконно-оптического гироскопа в 0,01°/ч (1σ) уже при незначительном изменении температуры. Полученные в работе данные обусловили необходимость доработки источника и введения механизма термостабилизации его активных элементов.

Ключевые слова: ВОГ, тепловой дрейф ВОГ, эрбиевый широкополосный источник излучения, дрейф нуля ВОГ, дрейф масштабного коэффициента ВОГ.

Введение

Уже несколько десятилетий волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) успешно используются в системах навигации, ориентации и стабилизации. В настоящее время ВОГ производятся многими индустриально развитыми странами – США (Northrop Grumman, KVH Industries, Honeywell), Франция (IXSEA) и др. По своим точностным и эксплуатационным характеристикам ВОГ не уступают другим типам гироскопов, а по ряду параметров, таких как меньшая себестоимость, отсутствие вращающихся частей, больший срок службы, меньшее время выхода на режим и т.д., даже превосходят их. ВОГ выделяется среди других приборов навигации наибольшей сложностью и многообразием происходящих в нем физических явлений [1].

Существует ряд публикаций ([2–9] и др.), в которых обсуждается проблема теплового дрейфа. На основе этих материалов можно с уверенностью сказать о невозможности создания ВОГ навигационного класса точности без учета влияния температурного дрейфа.

Исследования влияния температуры на активные элементы (источник, волоконно-оптический контур, модулятор и т.д.) разрабатываемого ВОГ также показали наличие большого количества различных процессов, приводящих к изменению характеристик элементов при их нагреве и соответственно к дрейфу показаний ВОГ. Целью настоящей работы является исследование влияния температурной нестабильности характеристик источника излучения на показания волоконно-оптического гироскопа.

Влияние источника излучения на стабильность масштабного коэффициента

Как известно, работа волоконно-оптического гироскопа основана на эффекте Саньяка, заключающемся в том, что при вращении волоконно-оптического интерферометра со скоростью Ω лучи, распро-

страняющиеся в противоположных направлениях, приобретают набег фаз $\Delta\varphi$, пропорциональный действующей угловой скорости [10]:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi RL}{\lambda_c c}\Omega, \qquad (1)$$

где λ_c – центральная длина волны; c – скорость света; R – радиус катушки; L – длина волокна.

Множитель, стоящий перед Ω, обычно рассматривают как масштабный коэффициент (МК). Из (1) видно, что стабильность центральной длины волны напрямую влияет на значение МК:

$$\text{МК} = \frac{4\pi RL}{\lambda_c c}.$$

В [1] указано, что для создания ВОГ навигационного класса изменение центральной длины волны источника должно быть меньше 10^{-6} $К^{-1}$. Помимо высокой стабильности характеристик, к источнику предъявляется еще ряд требований, в том числе экономических.

В рамках работы еще на первых этапах разработки ВОГ был проведен поиск и анализ литературных источников отечественных и западных изданий, посвященных применению источников оптического излучения в ВОГ. Очевидно, что для уменьшения эффекта паразитных интерферометров необходимо использовать неполяризованный широкополосный источник излучения [1, 2, 9, 11]. Широкополосные полупроводниковые источники имеют малую степень поляризации, однако их применение допустимо лишь в ВОГ с точностью порядка 1 °/ч. Связано это с тем, что характеристики полупроводниковых источников сильно подвержены внешним факторам, в частности, имеется сильная зависимость спектра от температуры и тока накачки. Но самым негативным является то, что данный тип источников подвержен процессам старения, в ходе которых у него изменяется спектр. В процессе эксплуатации ВОГ это приводит к непредсказуемым изменениям и уходу масштабного коэффициента [2]. Исходя из этого, преимущество было отдано эрбиевому широкополосному источнику, достоинства которого по сравнению с полупроводниковыми описаны в работе [5].

Расчет влияния стабильности центральной длины волны на стабильность масштабного коэффициента

В рамках работы были исследованы образцы выбранных волоконных эрбиевых широкоплосных источников на наличие зависимости длины волны источника света от температуры (рис. 1). Видно, что нагрев приводит к изменению спектра.

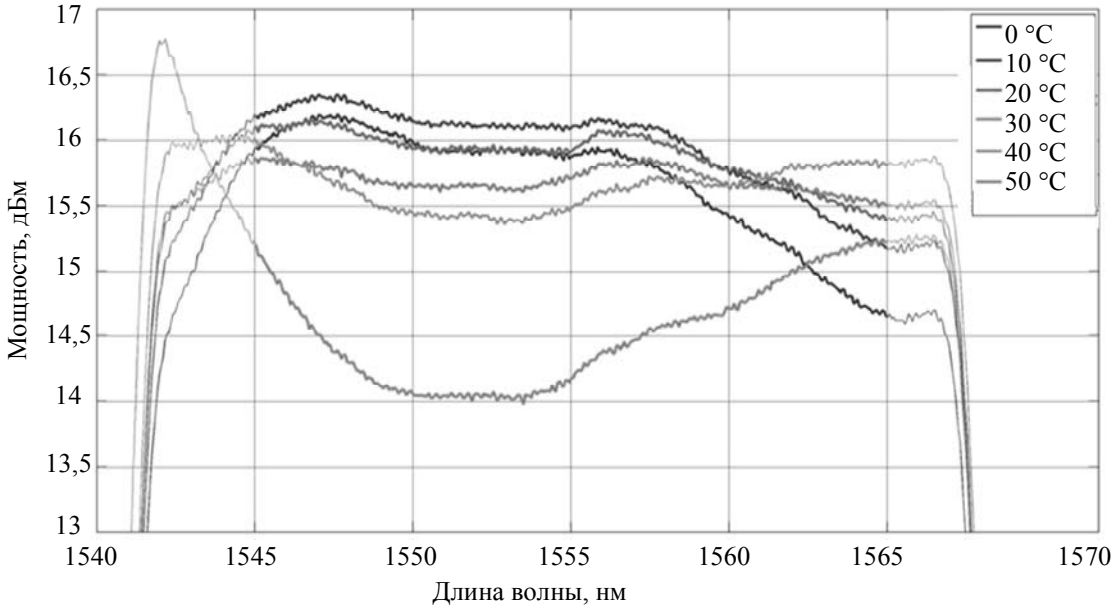


Рис. 1. Влияние температуры на спектр источника излучения при стабилизации по мощности (данные предоставлены производителем источника)

Для полученных спектров были вычислены центральные длины волн источника при различных температурах. Абсолютное изменение центральной длины волны излучения источника при измерении температуры от 0 до 50 °C (ΔT=50 К) составляет $\Delta\lambda$ = 0,43 нм (данные предоставлены производителем источника). Для вычисления ошибки МК из-за изменения центральной длины волны продифференцируем (1):

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{4\pi RL}{c \cdot \lambda^2}\Omega;$$

$$d\varphi = \frac{4\pi RL}{c\lambda}\frac{d\lambda}{\lambda}\Omega = \frac{d\lambda}{\lambda}\text{МК} \cdot \Omega;$$

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{d\lambda}{\lambda}. \qquad (2)$$

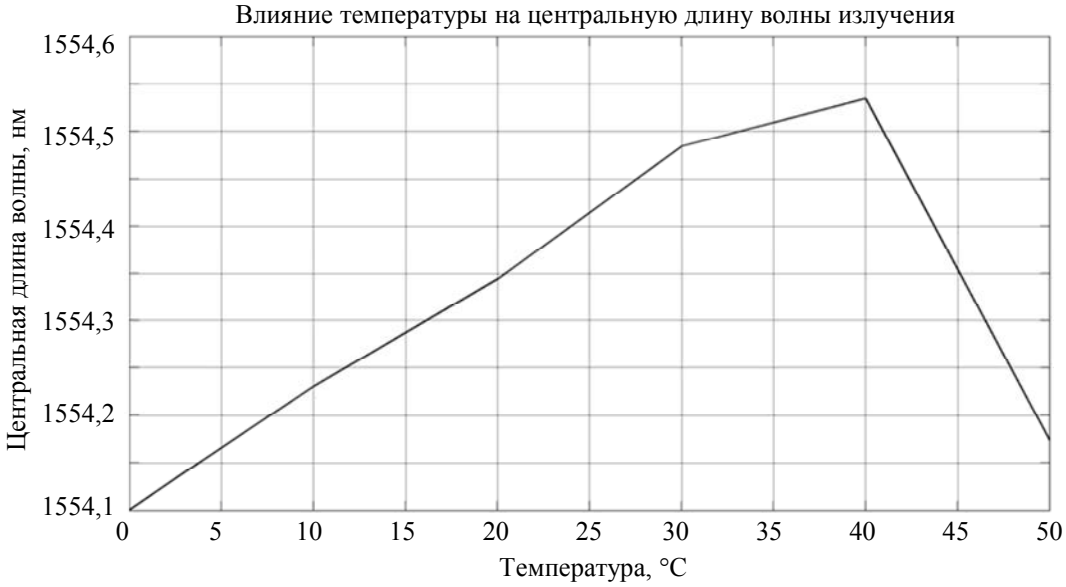


Рис. 2. Влияние температуры на центральную длину волны источника при стабилизации по мощности (данные предоставлены производителем источника)

Подставляя полученные экспериментальные данные в (2), получим относительное изменение детектируемой фазы на 1К:

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{ср}}\Delta T} = 5{,}53 \cdot 10^{-6}\,\text{К}^{-1}.$$

При скорости вращения Земли (~13 °/ч) абсолютная ошибка определения скорости вращения составит

$$d\Omega_{\text{ош}} = \frac{d\varphi}{\varphi}\Omega,$$

$$d\Omega_{\text{ош}} = 7{,}2 \cdot 10^{-5}\left(^\circ/\text{ч}\right) \cdot \text{К}^{-1}.$$

При скорости вращения 1°/с (3600 °/ч), которую должен детектировать ВОГ, ошибка уже составит $1{,}9 \cdot 10^{-2}$(°/ч) $\cdot$К$^{-1}$, что превышает запланированную погрешность ВОГ в 0,01 °/ч.

Экспериментальное исследование влияния источника излучения на сигнал ВОГ

Для сравнения полученной выше зависимости МК от температуры источника с реальным дрейфом ВОГ были проведены исследования, целью которых являлось экспериментальное определение влияния температурной нестабильности характеристик (мощность, спектр, поляризация) источника излучения на выходной сигнал гироскопа. В ходе экспериментов источник помещался в термокамеру с изменяющейся температурой в диапазоне от +15°С до +30°С. Сам ВОГ помещался в камеру со стабильной температурой +15°С. Результаты эксперимента приведены на рис. 3.

Абсолютная ошибка определения скорости вращения (при скорости вращения Земли ~13 °/ч) на 1К составила

$$d\Omega_{\text{ош}} = \frac{\Omega(t = 21{,}38) - \Omega(t = 21{,}86)}{\Delta T} = 0{,}003\left(^\circ/\text{ч}\right) \cdot \text{К}^{-1}$$

Для отделения дрейфа нуля от ухода МК был повторен предыдущий эксперимент, в котором был произведен переворот плоскости волоконно-оптического контура на 180°. Полученные результаты приведены на рис. 4.

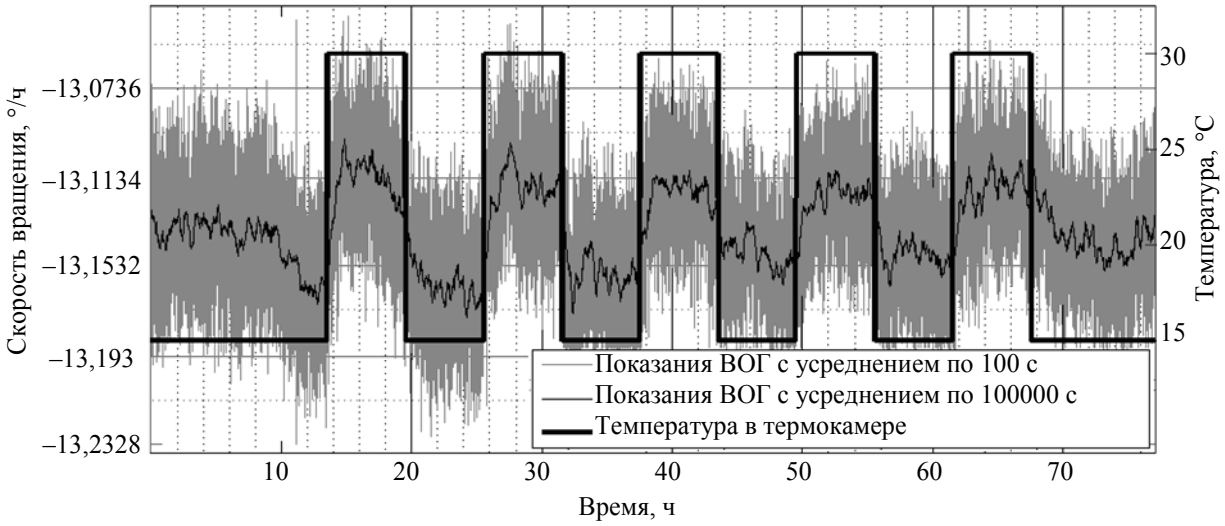


Рис. 3. Влияние температуры источника на показания ВОГ (источник в режиме стабилизации по оптической мощности). Среднеквадратичное отклонение (СКО) составило 0,05 при усреднении по 100 с

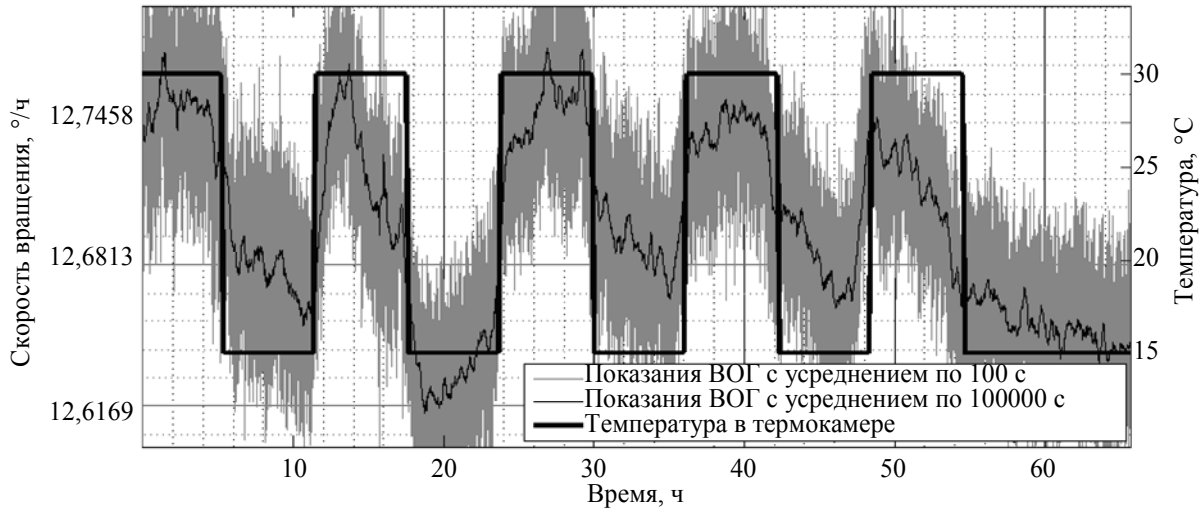


Рис. 4. Влияние температуры источника на показания ВОГ после переворота (источник в режиме стабилизации по оптической мощности). СКО составило 0,05 при усреднении по 100 с

Дрейф показаний ВОГ на составил

$$d\Omega_{\text{ош}} = \frac{\Omega(t = 21,38) - \Omega(t = 21,86)}{\Delta T} = 0,004\left(^{\circ}/\text{ч}\right) \cdot \text{К}^{-1}.$$

Ошибка, возникающая при нагреве источника, оказалась больше, чем рассчитанная ранее для МК, что связано в большей степени с дрейфом нуля, а не с уходом МК. Провести исследование влияния температуры источника на показания ВОГ при больших скоростях вращения, к сожалению, на данный момент не представляется возможным из-за технических ограничений используемого оборудования: для этого эксперимента необходимо осуществлять вращение двух термокамер. Сам механизм влияния температуры источника на дрейф нуля на данный момент исследуется. Однако, очевидно, обнаруженный дрейф нуля не позволяет достичь необходимой точности ВОГ в 0,01/ч даже при низких скоростях вращения и при незначительном изменении температуры.

Заключение

В ходе работы было выявлено, что температурная нестабильность источника излучения при больших скоростях вращения оказывает наибольшее влияние на изменение масштабного коэффициента, но при малых скоростях вращения более значимым становится экспериментально обнаруженный дрейф нуля. Возникающая при этом ошибка показаний волоконно-оптического гироскопа (из-за дрейфа нуля и изменения масштабного коэффициента) не позволяет достичь необходимой точности волоконно-оптического гироскопа в 0,01°/ч (1σ) уже при незначительном изменении температуры источника.

Полученные данные послужили толчком для исследования методов повышения стабильности спектра, мощности и степени поляризации источника излучения. Оказалось, что у используемого в экс-

периментальных волоконно-оптических гироскопах широкополосного эрбиевого источника отсутствует система термостабилизации диодов накачки и оптического фильтра. С производителем было достигнуто соглашение об установке элементов Пельтье на активные элементы с целью уменьшения влияния температуры на выходные характеристики источника.

Помимо этого, в алгоритм обработки оптического сигнала, детектируемого фотоприемником, было предложено добавить механизм нормировки, позволяющий уменьшить влияние нестабильности характеристик источника во времени на дрейф нуля в сигнале волоконно-оптического гироскопа.

Работа выполнена в НИУ ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

Литература

1. Листвин В.Н., Логозинский В.Н. Волоконно-оптический датчик вращения // Физоптика, 2011 [Электронный ресурс]. – URL: www.fizoptika.ru/describtion/book_bind.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.10.1013).
2. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope // Artech House, London, 1992. – 314 p.
3. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope: Achievement And Perspective // Proceedings of 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 2012. – P. 122–126.
4. Lefevre H.C. Ultimate-performance Fiber-optic Gyroscope: A Reality // 16th OptoElectronics and Communications Conference, Kaohsiung, Taiwan. – 2011. – P. 75–78.
5. Shupe D.M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer // Applied optics. – 1980. – V. 19. – P. 654–655.
6. Голиков А.В. Температурные погрешности волоконно-оптических гироскопов: Дис. канд. техн. наук. – Саратов, 2001. – 197 с.
7. Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Киселев Е.В., Ошивалов М.А., Ульрих Т.А. Тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 1. – С. 32–37.
8. Драницына Е.В., Егоров Д.А. Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля // Навигация и управление движением: Материалы докладов XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – С. 447–452.
9. Драницына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А., Дейнека Г.Б., Шарков И.А., Дейнека И.Г. Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. – СПб, 2012. – № 4 (79). – С. 10–20.
10. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
11. Pepe G.Davis, Bush Jeff. Broadband erbium source for fiber optic sensor applications // Third Pacific Northwest Fiber Optic Sensor Workshop 10, September 2. – 1997. – P. 10–18.

Шарков Илья Александрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник, ilya.sharkov@gmail.com

Рупасов Андрей Викторович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sadbender@yandex.ru

Стригалев Владимир Евгеньевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru

Волковский Сергей Александрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, zhivotnoe1941@mail.ru

3 ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА

УДК 519.688, 537.877

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ОБЪЕКТОВ, ОБЛАДАЮЩИХ РАДИАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ

К.Б. Самусев, М.В. Рыбин, М.Ф. Лимонов

Описан алгоритм вычисления статистических геометрических параметров ансамбля объектов, границы которых обладают радиальной симметрией. К таким объектам относятся цилиндры и сферы, которые являются структурными элементами, образующими фотонные кристаллы и диэлектрические метаматериалы. Основу алгоритма составляет процедура распознавания, основанная на преобразовании исходного изображения по методу, аналогичному преобразованию Хо. Метод позволяет определять диаметры и координаты центров отдельных объектов.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, метаматериалы, статистический анализ, процедура распознавания.

Введение

Фотонные кристаллы (ФК) [1, 2] и диэлектрические метаматериалы (ДММ) [3, 4] – это структуры, которые создаются искусственным путем, что обусловливает одно из их главных отличий от «обычных» кристаллов: «обычные» кристаллы состоят из абсолютно идентичных атомов или молекул, в то время как ФК и ДММ построены из рукотворных структурных элементов, которым присущи вариации в размере, форме, диэлектрической и магнитной проницаемости. Эта неоднородность неустранима и будет существовать в любом ФК и ДММ. По этой причине определение статистических параметров структурных элементов, образующих ФК и ДММ, является принципиальной задачей.

В настоящей работе мы опишем алгоритм вычисления статистических геометрических параметров ансамбля объектов, границы которых обладают радиальной симметрией, т.е. цилиндров и сфер. Алгоритм позволяет определять диаметры и координаты центров отдельных объектов и, таким образом, вычислять усредненные постоянные кристаллической решетки и определять функцию распределения частиц по каждому из интересующих нас параметров. В случае цилиндра ключевым геометрическим параметром является, как правило, диаметр, а длина цилиндра не рассматривается в большинстве задач фотоники. Это связано с тем, что для формирования 2D ФК и ДММ цилиндры необходимо расположить параллельно друг другу (оси *z* параллельны) и перпендикулярно направлению распространения электромагнитной волны (рис. 1).

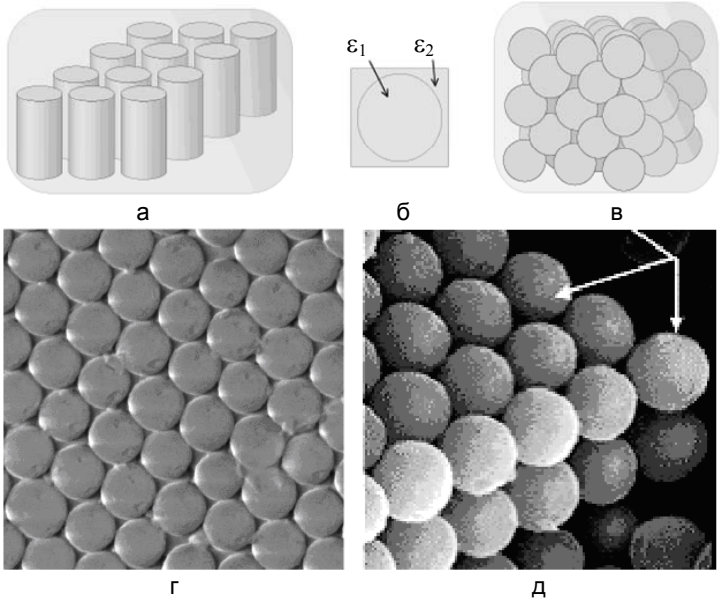


Рис. 1. Схематическое изображение фрагментов 2D периодической структуры, образованной цилиндрами (а) и 3D периодической структуры, образованной сферами (в). Сечение отдельного элемента обеих структур – вид сверху (б). Изображение плоскости *xy* 2D плотноупакованной структуры (г) и 3D плотноупакованной структуры – синтетического опала (д), полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии

Обычно предполагается, что цилиндры имеют достаточную длину для того, чтобы не учитывать граничные эффекты, в результате чего фотонные свойства определяются лишь радиусом цилиндров, по-

стоянной кристаллической решетки в плоскости *xy* и симметрией 2D-решетки. В случае сферы искомыми параметрами являются радиус и координаты центра сферы в 2D-плоскости заданного сечения. Классическим примером 3D ФК являются синтетические опалы [2, 5] и опалоподобные коллоидные кристаллы [2]. В коллоидных кристаллах основным структурным элементом являются частицы, имеющие форму, близкую к сферической. Размер частиц в различных образцах может варьироваться в пределах 200–1000 нм.

Во многих статьях, посвященных изучению синтетических опалов, рассматривают модельную структуру, состоящую из идеальных недеформированных шаров a-SiO_2 одинакового размера, которые находятся в точечном контакте друг с другом и образуют гранецентрированную кубическую решетку. В такой идеальной решетке шары занимают 74% объема образца, а остальные 26% приходятся на долю пустот. Однако такая модель представляет собой приближение, не вполне соответствующее реальности. Отклонение от идеальной модели хорошо прослеживается на изображениях, полученных с помощью электронной микроскопии, а также следует из результатов обработки спектров брэгговского отражения света от синтетических опалов [2]. Для получения численных характеристик структуры, таких как среднее значение и дисперсия размера частиц, необходимо применять специальные методы обработки, подобные методу, использованному в [6] для подсчета числа объектов в поле зрения микроскопа. Другие известные из литературы методики основаны на изучении пространственного фурье-спектра [7] и методе подсчета количества центров, попадающих в кольцо заданного радиуса [8]. Однако эти методы являются интегральными и не позволяют раздельно определить такие параметры, как разброс диаметров частиц и расстояний между их центрами. Настоящая работа решает эту задачу, представляя алгоритм нахождения размера и положения каждой частиц в пространстве.

Алгоритм вычисления статистических геометрических параметров

Определим термины, которые мы будем использовать в данной работе. Следуя монографии [9], под изображением мы будем понимать двумерную функцию $f(x, y)$, где x и y – координаты точки на плоскости. Значение функции $f(x, y)$ будем называть яркостью (интенсивностью) изображения в точке (x, y). В случае цифрового изображения величины x, y и $f(x, y)$ принимают конечное число дискретных значений. Цифровое изображение состоит из конечного числа элементов, каждый из которых характеризуется тремя целыми неотрицательными числами – двумя координатами и яркостью. На координаты никаких специальных ограничений не накладывается, однако яркость может принимать значения только в интервале $[0, L–1]$, где L – число уровней (градаций) яркости. Из соображений удобства число уровней яркости принимают равным целой степени двойки, т.е. $L = 2^k$. Эти элементы называют элементами изображения или пикселями.

В основе алгоритма лежит процедура распознавания объектов, граница которых обладает радиальной симметрией. Процедура состоит в преобразовании исходного изображения по методу, аналогичному преобразованию Хо [9], которое позволяет находить на монохромном изображении кривые, заданные параметрически. Монохромным считается изображение, состоящее из точек двух типов – точек контура, ограничивающего объект (например, окружность, ограничивающая круг), и фоновых точек, к которым относятся как точки вне, так и внутри объекта. Исходя из этого, полутоновое изображение должно быть предварительно трансформировано в монохромное (содержащее только контур объекта и фон) с использованием какого-либо градиентного фильтра, например, фильтра Превитта [9], Собеля [10] или Кенни [11], с последующей пороговой обработкой. Задача преобразования Хо состоит в выделении кривых, проходящих через максимальное количество точек контура объекта.

Поясним принцип преобразования Хо. Пусть $F(x, y, a_1, a_2, \ldots, a_n) = 0$ – некоторая функция, задающая на плоскости (x, y) семейство кривых с параметрами a_1, a_2,…, a_n. Параметры семейства кривых образуют фазовое пространство, каждая точка которого (конкретные значения набора a_1, a_2,…, a_n) соответствует некоторой кривой на плоскости (x, y). Ввиду дискретности машинного представления непрерывное фазовое пространство требуется перевести в дискретное. Для этого в фазовом пространстве a_1, a_2,…, a_n вводится «сетка», разбивающая его на ячейки достаточно малого размера. Каждой ячейке можно поставить в соответствие число A, указывающее количество точек контура объекта, принадлежащих кривой с параметрами данной ячейки. В результате можно найти кривые $F(x, y, a_1, a_2, \ldots, a_n) = 0$, на которых лежит наибольшее количество точек контура объекта.

Для объектов, граница которых обладает радиальной симметрией (сечение цилиндра, сферы), задача $F(x, y, x_0, y_0, R_0) = 0$ сводится к поиску окружностей неизвестного радиуса с неизвестными координатами центра $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - R_0^2 = 0$. При переходе от непрерывного пространства параметров (x_0, y_0, R_0) к дискретному, с которым мы будем работать, получаем трехмерный массив целых неотрицательных чисел A_{nmk}, индексы которого (n, m, k) задают набор параметров (x_0, y_0, R_0). Два индекса этого массива (n, m) определяют координаты центров окружностей (соответствуют паре x_0, y_0) в пространстве изображения, а третий индекс (k) – радиус окружности R_0. Далее введем понятие двумерного сечения

B_{nm} трехмерного массива A_{nmk}. Трехмерный массив представляет собой последовательность двумерных сечений с размерностью ($n \times m$), совпадающей с размерностью исходного изображения, причем последовательность упорядочена по возрастанию радиуса R_0.

Преобразование исходного изображения (например, изображения, представленного на рис. 1, г) в трехмерный массив чисел сводится к тому, что каждому элементу A_{nmk} присваивается значение, равное количеству точек контура изображения (например, контура, ограничивающего цилиндры на рис. 1, г), лежащих на окружности с центром в точке (n, m) и радиусом, равным k. Процедура подсчета числа точек монохромного изображения, лежащих на окружности радиуса k, эквивалентна нахождению дискретной свертки изображения с ядром (маской), представляющим собой квадратную матрицу размером $2k+1$. Элементы этой матрицы, лежащие на вписанной окружности, равны 1, а остальные – нулю. Таким образом, алгоритм включает в себя ряд последовательных преобразований исходного изображения, которые мы кратко опишем. На рис. 2 представлена первая часть этих преобразований. Фрагмент исходной полутоновой картинки (рис. 2, а) с помощью градиентного фильтра Кенни [11] и пороговой обработки (рис. 3) преобразуется в монохромное изображение границ (рис. 2, б). Это монохромное изображение подвергается описанному выше преобразованию, аналогичному преобразованию Хо [9]. На рис. 2, г, в качестве примера представлено одно сечение нормированного трехмерного массива A_{nmk}/k, которое является результатом свертки монохромного изображения (рис. 2, б) с маской радиуса k=88 пикселей (рис. 2, в), $\mathbf{b} * \mathbf{c} \to \mathrm{d}$.

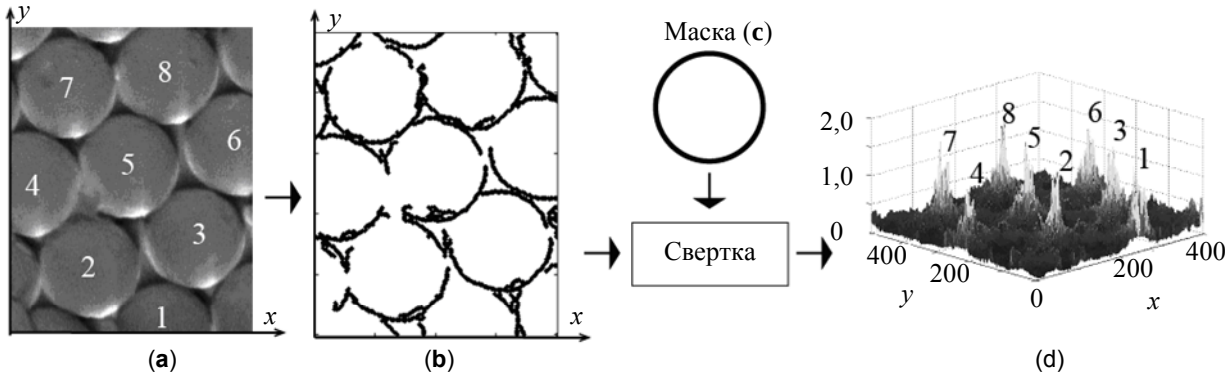


Рис. 2. Преобразование исходного полутонового изображения в процессе распознавания структур, обладающих круговой симметрией: исходное полутоновое изображение структуры плотноупакованных пронумерованных цилиндров (**a**); монохромное изображение границ цилиндров, полученное после применения градиентного фильтра Кенни и пороговой обработки (**b**); изображение квадратной матрицы 177×177 пикселей с вписанной окружностью радиуса k=88 пикселей; свертка A_{nmk}/k контурного изображения с ядром, нормированная на радиус k=88 ($\mathbf{b} * \mathbf{c} \to \mathrm{d}$). Нумерация пиков соответствует нумерации цилиндров на панели (**a**)

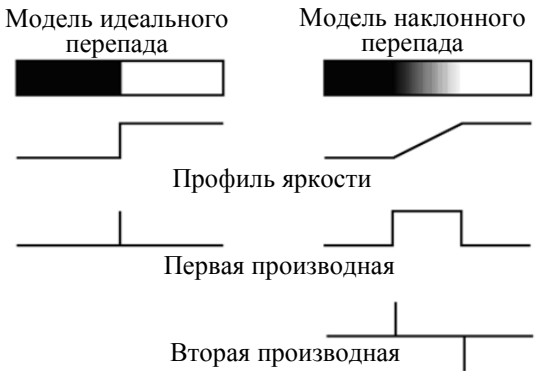


Рис. 3. Пороговая обработка: выделение границ путем дифференцирования профиля яркости на границе объекта. Граница определяется по первой либо второй производной от функции яркости

Далее производится варьирование радиуса маски в широком интервале пикселей (для данного объекта, например, в интервале 50<k<150), при этом центр маски сканируется по всему полю изображения, представленного на рис. 2, а. Результирующий трехмерный массив A_{nmk} является входной информацией для процедуры распознавания объектов (рис. 2, а), состоящей в нахождении радиусов цилиндров и координат их центров. Массив состоит из целого ряда двумерных сечений B_{nm}, представляющих собой свертки контурного изображения с ядрами различных радиусов 50<k<150. На рис. 4 в качестве примера

представлены результаты трех из ста двумерных сечений свертки контурного изображения с тремя масками радиусов k=75, 88, 99 пикселей. Локальные экстремумы (пики) на рис. 2, г, совпадают с центрами соответствующих частиц на рис. 2, а. Радиус отдельной частицы определяется по зависимости высоты пика от радиуса ядра свертки k, которая всегда имеет достаточно четко выраженный экстремум. За радиус распознанной частицы принимается радиус маски k, при котором соответствующий пик свертки $\mathbf{b}*\mathbf{c}$ достигает своего максимального значения, а за координаты ее центра – координаты этого пика (n, m). На рис. 5, в, показан основной результат процедуры распознавания – распределение диаметров частиц и межцентровых расстояний для образца, представленного на рис. 2, а.

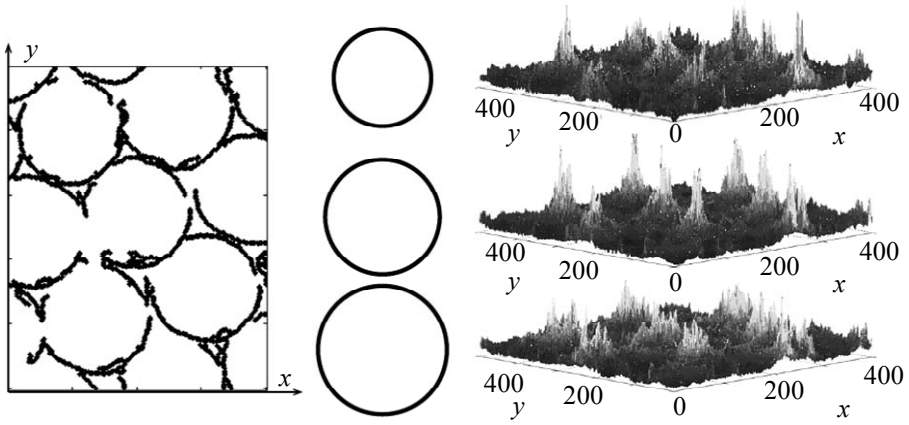


Рис. 4. Свертка монохромного изображения с окружностями трех различных радиусов. Схематичное представление фрагмента трехмерного массива данных A_{nmk}/k, получаемого в результате выполнения описанного преобразования контурного изображения для радиусов маски k=75, 88 и 99 пикселей

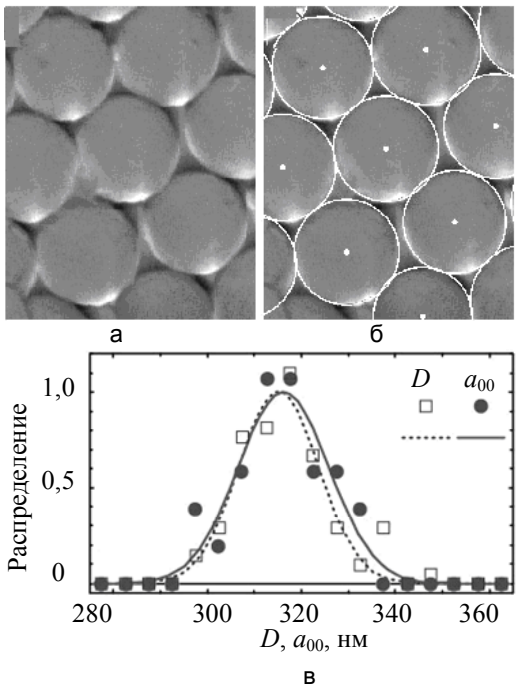


Рис. 5. а – исходное изображение структуры; б – изображение структуры с нанесенными окружностями и центрами окружностей, найденными в результате процедуры распознавания; в – дисперсия диаметров частиц D и межцентровых расстояний a_{00} для образца, представленного на панели а

Заключение

Результаты визуализации различных макро-, микро- и нанообъектов, получаемые самыми различными методами, начиная от простого оптического фотографирования до применения электронной микроскопии, содержат богатую информацию о симметрии, дефектах, форме и размерах частиц, образующих фотонные кристаллы и диэлектрические метаматериалы. Однако для получения численных характеристик (среднее значение, дисперсия) необходимо применять специальные методы обработки, позволяющие находить индивидуальные геометрические размеры и положения частиц.

В работе представлен алгоритм для определения статистических характеристик ансамбля частиц, образующих фотонные кристаллы либо диэлектрические метаматериалы. Следует отметить, что исходное соотношение алгоритма $F(x, y, a_1, a_2, \ldots, a_n) = 0$, т.е. функция, задающая на плоскости (x, y) семейство кривых с параметрами a_1, a_2,…, a_n, совсем не обязательно должна сводиться к уравнению окружности $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - R_0^2 = 0$. Алгоритм позволяет распознавать объекты любой формы, однако количество параметров и, следовательно, время вычислений и возможные погрешности вычислений существенно возрастают. Мы подробно рассмотрели случай окружности в качестве примера для демонстрации метода обработки изображений широко распространенных структур, состоящих из цилиндров или сфер. Такие объекты имеют границы с радиальной симметрией, и задача $F(x, y, x_0, y_0, R_0) = 0$ сводится к поиску массива трех параметров (x_0, y_0, R_0). Полученные результаты, представленные на рис. 5, демонстрируют высокую эффективность данного алгоритма.

Авторы благодарят П.А. Белова и Ю.С. Кившаря за обсуждение результатов работы. Работа выполнена в НИУ ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.B37.21.1964) и РФФИ (проект № 11-02-00865).

Литература

1. Inoue K. and Ohtaka K. Photonic Crystals: Physics, Fabrication and Applications. – Springer, 2004. – 332 p.
2. Limonov M.F. and De La Rue R.M. Optical properties of photonic structures: interplay of order and disorder. – CRC Press, Taylor & Francis Group 2012. – 514 p.
3. O'Brien S. and Pendry J.B. Photonic band-gap effects and magnetic activity in dielectric composites // J. Phys.: Cond. Matt. – 2002. – V. 14. – P. 4035.
4. Hosseinzadeh A. and Semouchkina E. Effect of permittivity on energy band diagrams of dielectric metamaterial arrays // MOTL. – 2013. – V. 55. – P. 134–137.
5. Rybin M.V., Sinev I.S., Samusev A.K., Samusev K.B., Trofimova E.Yu., Kurdyukov D.A., Golubev V.G. and Limonov M.F. Dimensionality effects on the optical diffraction from opal-based photonic structures // Phys. Rev. B. – 2013. – V. 87. – P. 125131.
6. Дырнаев А.В., Потапов А.С. Комбинированный метод подсчета эритроцитов на изображениях мазков крови // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 1 (77). – С. 19–23.
7. Palacios-Lidón E., Juárez B.H., Castillo-Martínez E. and López C. Optical and morphological study of disorder in opals // J. Appl. Phys. – 2005. – V. 97. – P. 63502.
8. Rengarajan R., Mittleman D., Rich C. and Colvin V. Effect of disorder on the optical properties of colloidal crystals // Phys. Rev. E. – 2005. – V. 71. – P. 16615.
9. Gonzalez R.C. Woods R.E. Digital Image Processing. – Prentice Hall, 2002. – Chapter 10. – 793 p.
10. Sobel I. An isotropic image gradient operator. Machine Vision for Three-Dimensional Scenes. – N.Y.: Academic Press. – 1990. – P. 376–379.
11. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – V. 8. – P. 679.

Самусев Кирилл Борисович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, k.samusev@phoi.ifmo.ru

Рыбин Михаил Валерьевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, m.rybin@phoi.ifmo.ru

Лимонов Михаил Феликсович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, m.limonov@phoi.ifmo.ru

УДК 004.932

МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ СТЕРЕОЗРЕНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА

С.В. Пономарев

Представлены результаты сравнительного анализа эффективности алгоритмов стереозрения в рамках решения задачи восстановления трехмерной модели лица человека. Рассмотрены методы стереозрения, относящиеся к трем основным классам – локальные, глобальные и полуглобальные методы. В качестве критериев количественной оценки работы алгоритмов предложена мера расхождения восстановленной карты дальности и эталонной карты дальности, полученной с использованием камеры со структурированной инфракрасной подсветкой. При сравнении осуществлялся переход в трехмерное пространство, проводилось вычисление характеристик облака точек, учитывалось каче-

ство трехмерной поверхности, восстановленной с помощью карты дальности, и данные о производительности алгоритмов. На основе количественной и качественной оценки работы алгоритмов произведен выбор наилучшего алгоритма. Результаты работы могут быть использованы для повышения эффективности применения методов стереозрения в целях идентификации личности человека.
Ключевые слова: карта дальности, алгоритмы стереозрения, трехмерная модель лица, биометрические системы.

Введение

В настоящее время актуальна разработка биометрических систем, позволяющих обеспечить автоматическую идентификацию личности человека с высокой степенью надежности. Одним из перспективных направлений в данной области является восстановление трехмерной информации о форме лица. Использование трехмерной модели лица человека в качестве дополнительного идентификатора личности позволяет повысить надежность и качество распознавания, ускорить процесс идентификации.

Для решения этой задачи применяются различные программные и аппаратные средства, в частности, одним из возможных вариантов является использование трехмерных сканеров, которые, обладая высокой точностью, имеют ряд ограничений в применении к живым объектам. Ограничения связаны с требованием статичности сканируемого объекта в течение всего времени сканирования, чего трудно достичь в случае человека, а также с тем, что сканирование является активным методом исследования, связанным с освещением анализируемого объекта, что накладывает значительные ограничения на характер излучения с точки зрения безопасности здоровья человека. Помимо 3D-сканеров, для восстановления трехмерной формы объектов может применяться также метод восстановления глубины из фокусировки [1], но он не подходит для динамичных объектов.

В то же время использование пассивных методов, работающих в условиях естественного освещения, потенциально имеет более широкое применение. В этой связи перспективны методы стереоскопического зрения [2]. Несмотря на то, что было разработано большое число алгоритмов, позволяющих решить проблему стереозрения, лишь небольшое число работ посвящено сравнению существующих алгоритмов и оценке их производительности. В [3] представлена одна из наиболее полных классификаций алгоритмов стереозрения, однако оценка характеристик алгоритмов проводилась для наиболее общего случая без учета специфики различных предметных областей.

С другой стороны, известны работы, в которых исследовалось решение проблемы стереозрения непосредственно для восстановления трехмерной модели лица человека [2, 4], но на момент их публикации некоторые алгоритмы, которые сейчас являются распространенными, в частности, полуглобальный алгоритм стереозрения [5], еще не были представлены. Разработанная в настоящей работе методика количественной и качественной оценки характеристик алгоритмов стереозрения позволяет выявить наиболее эффективные алгоритмы для данной предметной области при рассмотрении широко используемых в настоящее время алгоритмов.

Классификация алгоритмов стереозрения

Существуют различные варианты классификации алгоритмов сопоставления двух изображений для создания системы стереозрения. Один из наиболее распространенных вариантов состоит в разделении на локальные и глобальные алгоритмы [3]. Для локальных алгоритмов диспаратность вычисляется для каждой точки изображения и зависит только от сравнения локальных областей – окон вокруг каждой точки и соответствующей точки на сопоставляемом изображении. В глобальных алгоритмах диспаратность находится для всех пикселей сопоставляемых изображений, при этом вычисляется минимум функционала энергии

$$E(f) = E_d(f) + \lambda E_s(f), \qquad (1)$$

где $E_d(f)$ – унарный потенциал, который характеризует степень согласованности данной конфигурации с парой входных изображений и вычисляется с помощью пиксельных стоимостей; $E_s(f)$ – парный потенциал, который явным образом реализует предположение о гладкости, т.е. накапливает величину штрафа, налагаемого на данную конфигурацию при нарушении непрерывности диспаратностей.

Реализацию большинства алгоритмов, относящихся как к локальному, так и к глобальному подходу, можно условно представить в виде четырех этапов:

– подсчет стоимости соответствий;
– суммирование найденных стоимостей;
– вычисление и оптимизация диспаратностей;
– уточнение диспаратностей.

В локальных алгоритмах для того, чтобы определить совпадение точек на двух изображениях, используется подсчет стоимости соответствия для каждого пикселя в строке; самым вероятным кандидатом является точка с наименьшей стоимостью.

Существует несколько различных подходов, основанных на вычислении стоимости значений интенсивности пикселей. Можно выделить такие способы, как нахождение абсолютной разности интенсивностей (Absolute Intensity Differences, AD) и квадрата разности интенсивностей (Squared Intensity

Differences, SD). Абстрагируясь от функции стоимости, можно записать выражение для вычисления стоимости соответствия точек в виде

$$d_p = \arg\min \sum_{q \in W_p} c\left(q, q-d\right), \quad 0 \le d \le d_{\max}$$

где d_p – искомая диспаратность в пикселе p; $c(p, q)$ – функция стоимости перехода от пикселя p к пикселю q; W_p – окно вокруг пикселя p; $d_{\max}$ – максимальное значение диспаратности.

Для квадрата разностей интенсивностей это выражение примет вид

$$SDC(p,d) = \sum_{p \in W} \left| I_{bp} - I_{mq} \right|^2, \quad q = p - d\ .$$

Для абсолютной разности интенсивностей выражение будет следующим:

$$ABC(p,d) = \sum_{p \in W} \left| I_{bp} - I_{mq} \right|, \quad q = p - d\ .$$

Эффективность обоих подходов весьма высока, но из-за предположения о совпадении интенсивностей у соответствующих точек стереопары сильное влияние на конечный результат оказывают как особенности съемки (экспозиция, случайные блики), так и шумы.

Целью глобального подхода является нахождение наилучшей карты диспаратности для всего изображения. Типичным способом решения проблемы соответствия для глобальных алгоритмов является поиск минимума функционала энергии.

В связи с этим существует также разделение алгоритмов данной группы по способу минимизации энергии. Чаще всего используется либо динамическое программирование, либо нахождение минимального разреза графов (graph cuts). Алгоритмы разреза графов также получили название двумерных. Их производительность ниже, но результаты имеют более высокую точность. В ходе использования одномерных алгоритмов строки изображений обрабатываются независимо друг от друга. Вследствие этого их скорость выше, но возникает эффект «гребенки» – рассогласование значений диспаратности на уровне отдельных строк.

Рассмотрим поиск наилучшей конфигурации f для минимизации функционала глобальной энергии E, представленного в уравнении (1). Первое слагаемое, унарный потенциал, характеризует степень согласованности данной конфигурации с парой входных изображений и подсчитывается с помощью пиксельных стоимостей:

$$E_d(f) = \sum C\left(x, y, f\left(x, y\right)\right) = \sum_{p \in I} m\left(p, p - d_p\right).$$

Здесь $C(x, y, f(x, y))$ – функция пиксельной стоимости в общем виде; $m(p, q)$ – мера цветового сходства между пикселем p одного изображения и пикселем q другого изображения.

Второе слагаемое, парный потенциал, явным образом реализует предположение о гладкости, т.е. накапливает величину штрафа, налагаемого на данную конфигурацию при нарушении непрерывности диспаратностей. Обычно при вычислении парного потенциала учитываются соседние пиксели:

$$E_s(f) = \sum_{\langle p,q \rangle \in N} s\left(d_p, d_q\right),$$

где N – множество всех пар соседних пикселей; $s(d_p, d_q)$ – функция штрафа за нарушение гладкости.

Существует ряд решений для нахождения минимума функционала энергии, среди которых известны два наиболее распространенных подхода – динамическое программирование и использование случайных полей Маркова (нахождение минимального разреза графа, алгоритм распространения доверия).

Алгоритм полуглобального стереозрения Semi-Global Stereo Matching (SGSM) представляет собой совмещение принципов локального и глобального подходов. С одной стороны, поиск глобального минимума энергии является NP-полной задачей и не может быть осуществлен за приемлемое время. С другой стороны, можно выполнить очень быстрый поиск в одном измерении (построчно), в частности, с использованием динамического программирования. Однако возникает проблема рассогласованности отдельных строк, связанная с полной проверкой одного направления (построчного) и отсутствием проверок в остальных (например, по столбцам). Для устранения недостатков локального и глобального подходов был предложен способ агрегации стоимости соответствия точек – одновременное суммирование стоимости путей по всем направлениям [5].

Сравнительный анализ эффективности алгоритмов стереозрения

Было проведено сравнение рассмотренных выше алгоритмов с целью выявления наиболее подходящего для реконструкции карт дальности для поверхности лиц. Рассматривались следующие методы:

– корреляционный метод (локальный алгоритм с фиксированным размером окна) – CORR;
– глобальный алгоритм, основанный на динамическом программировании с применением DSI – DP;
– алгоритм разрезания графов (Graph Cuts) – GC;
– алгоритм распространения доверия (Belief Propagation) – BP;

– Semi-Global Stereo Matching – SGSM.

На рисунке отображены карты дальности, построенные данными алгоритмами для стереопар с изображениями человеческого лица.

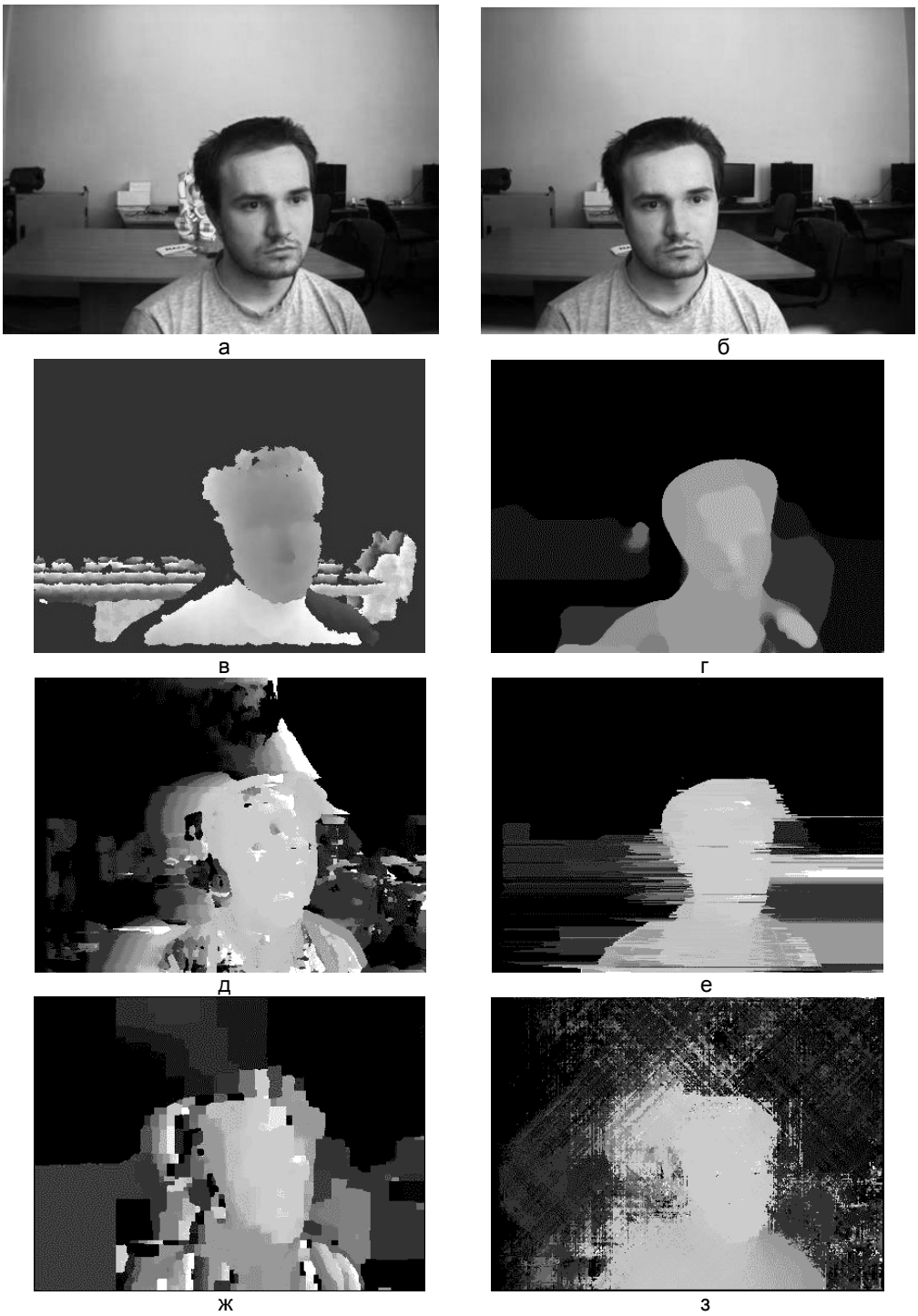


Рисунок. Результаты работы алгоритмов: (а)–(б) – исходная пара изображений; (в) – эталонная карта дальности; (г) – GC; (д) – CORR; (е) – DP; (ж) – BP; (з) – SGSM

Для количественной оценки эффективности представленных алгоритмов в качестве эталонной карты дальности была использована карта дальности, получаемая с камеры Kinect, работающей с использованием активной инфракрасной подсветки. Карты дальности, полученные в результате работы исследуемых алгоритмов стереозрения, сравнивались с эталонной картой следующим образом.

– Производилась локализация области лица на эталонной карте и карте сравнения, вычислялась средняя квадратичная ошибка непосредственно для двух изображений.
– Осуществлялся переход от двумерного к трехмерному представлению, т.е. карты дальности преобразовывались в облака точек с использованием внутренних параметров стереокамеры и камеры Kinect.

Облака точек выравнивались друг относительно друга, и вычислялась средняя квадратичная ошибка в трехмерном пространстве.

Для каждого алгоритма оценивалось время выполнения. Сводные результаты для группы исследуемых алгоритмов представлены в таблице.

Метод стереозрения	Среднее время работы, с	Средняя квадратичная ошибка, отн. ед.	MD, отн. ед.	DEV, отн. ед.
CORR	>0,1	34,63	0,23	0,21
SGSM	2,6	33,06	0,17	0,15
DP	4,6	33,32	0,18	0,14
BP	33,1	29,29	0,15	0,19
GC	550,0	26,63	0,14	0,14

Таблица. Количественная оценка эффективности алгоритмов
(MD – среднее расстояние между облаком точек, полученным для данного алгоритма и облаком точек для эталонной карты дальности; DEV – средняя квадратичная ошибка для среднего расстояния)

Опираясь на полученные результаты, можно провести качественную оценку работы алгоритмов. Учитывалось также и время выполнения методов. Самым быстрым, как и ожидалось, оказался локальный алгоритм (время порядка десятых долей секунды), но искажения и размытие контуров объектов не предполагают его использование для реконструкции объектов с большим числом мелких деталей. Глобальные методы позволяют восстановить карту диспаратности с обеспечением большей устойчивости, однако у алгоритма, основанного на динамическом программировании, наблюдается эффект «гребенки», устранение которого требует дополнительных мер постобработки в рамках последующего моделирования. Алгоритм Graph Cuts выполняется за большое время (порядка 10 мин), что делает невозможным его применение в реальных условиях (кроме того, получаемая карта недостаточно детальна по глубине). У алгоритма Belief Propagation наблюдаются ярко выраженные дефекты в фоновой области, по краям изображения резко снижается плавность переходов. Средняя квадратичная ошибка как в 2,5D, так и в трехмерном представлении, имеет меньшее значение для глобальных алгоритмов; для Belief Propagation характерно более высокое значение средней квадратичной ошибки для среднего расстояния между облаками точек, что подтверждает качественные оценки.

Метод SGSM, во-первых, оказался сравнимым по быстродействию с локальными алгоритмами, во-вторых, по сравнению с Graph cuts и Belief Propagation обеспечивает большую плавность для различных значений диспаратности. Его количественные характеристики сопоставимы с алгоритмом на основе динамического программирования. Рассогласованности наблюдаются только на уровне отдельных точек, тем самым упрощается процесс постобработки. В связи с этим эффективность данного метода в рамках решения задачи восстановления трехмерной модели лица выше.

В результате анализа быстродействия, качественной и количественной оценки полученных карт дальностей наилучшим был признан метод SGSM.

Заключение

В ходе работы был осуществлен сравнительный анализ методов стереозрения, относящихся к трем основным классам: локальные методы, глобальные методы и полуглобальные методы. Количественные и качественные оценки показывают, что наиболее предпочтительным для работы в исследуемой предметной области является алгоритм полуглобального стереозрения в силу возможности восстановления с его помощью плавных переходов дальности по изображениям лиц в масштабе почти реального времени.

Следует учитывать, что все рассмотренные алгоритмы стереозрения являются алгоритмами общего назначения, и результирующие карты дальности не являются оптимальными, так как содержат различные дефекты и не учитывают априорно известную предметно-специфическую информацию. В связи с этим представляется необходимой разработка методик, которые позволят на этапах постобработки и работы самого алгоритма повысить качество карт дальностей, используя ключевые особенности лица человека.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант МД-2040.2010.9.

Литература

1. Аверкин А.Н., Потапов А.С., Рожков А.С. Формирование и визуализация 3D-изображений микрообъектов по серии видеокадров с изменяемой фокусировкой // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 6 (76). – С. 12–16.
2. Leclercq P., Liu J., Woodward A., Delmas P. Which Stereo Matching Algorithm for Accurate 3D Face Creation? // IWCIA. – 2004. – P. 690–704.

3. Scharstein D., Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms // Int. Journal of Computer Vision. – 2002. – V. 47. – P. 7–42.
4. Chan M., Chen C.Y., Barton G., Delmas P., Gimelfarb G., Leclercq P., Fisher T.A. Strategy for 3D Face Analysis and Synthesis // Image and Vision Computing New Zealand Conference. – 2003. – P. 384–389.
5. Hirschmuller H. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2008. – V. 30. – № 2. – P. 328–341

.

Пономарев Святослав Владимирович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, инженер, sv.v.ponomarev@gmail.com

УДК 004.932.2

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

В.Н. Васильев, И.П. Гуров, А.С. Потапов

Рассмотрены широко применяющиеся в прикладных задачах методы компьютерного зрения. Установлено, что эти методы осуществляют анализ изображений преимущественно на одном уровне – пиксельном, контурном, структурном и т.д. Определены недостатки одноуровневых представлений изображений, ограничивающие инвариантные свойства использующих эти представления методов, что, в частности, выражается при решении задачи распознавания в снижении возможности по различению объектов разных классов. Обоснована возможность преодоления этих ограничений с помощью иерархических представлений. Предложены пути развития теории синтеза оптимальных иерархических систем анализа изображений, в которых снижение вероятности выбора наилучшей гипотезы верхнего уровня из-за принятия гипотез промежуточных уровней минимально. Минимизацию ошибки аппроксимации распределения апостериорных вероятностей гипотез верхних уровней путем учета их зависимости только от лучших гипотез нижних уровней предложено осуществлять с помощью введения обратных связей между уровнями и адаптивного выбора гипотез всех уровней с максимизацией их совместной вероятности.

Ключевые слова: иерархические представления, компьютерное зрение, анализ изображений.

Введение

Область компьютерного зрения приобретает все большее прикладное значение. При этом некоторые методы оказываются успешными при решении широкого круга задач, благодаря чему приобретают популярность и начинают использоваться многими разработчиками при создании прикладных систем компьютерного зрения, особенно после реализации этих методов в таких широко используемых при прототипировании программных библиотеках, как OpenCV. В качестве примера можно привести методы выделения ключевых точек на изображениях с последующим построением локальных инвариантных дескрипторов (наиболее известными являются SIFT [1] и SURF [2]), каскады Хаара, а также нейросетевые методы [3], используемые при выделении объектов с устойчивой формой, например, лиц людей, гистограммы ориентированных градиентов [4] (используемые, например, при детектировании пешеходов на изображениях), мешки визуальных слов [5] (популярные в задачах извлечения изображений из баз) и т.д.

Существуют также методы для решения таких задач, как построение плотных карт стереодиспаратности (например, методом отсечения графов или полуглобальным методом стереозрения [6]), и распространены готовые технические решения, наподобие устройства Kinect, весьма популярного у разработчиков систем компьютерного зрения при восстановлении трехмерной формы и распознавании поз и жестов людей.

Известны общепринятые методы обработки, например, метод Кенни для детектирования контуров или преобразование Хафа для построения геометрических элементов (тоже, кстати, реализованные в OpenCV и применяемые до сих пор [7]), но такие методы не давали законченного решения конкретных задач и не имели стандартной реализации. Сейчас для решения многих частных прикладных задач целесообразно воспользоваться имеющимся инструментарием. У специалистов, использующих компьютерное зрение при решении практических задач, вполне может сложиться впечатление, что знания имеющегося инструментария и умения его применять вполне достаточно для работы в этой области.

С учетом того, что появление упомянутых эффективных на практике методов вряд ли можно считать результатом какого-то научного прорыва, возникает естественный вопрос о теоретическом прогрессе в данной области, его направленности и востребованности. Здесь необходимо отметить, что существует множество очень сложных задач, которые не могут быть решены с помощью имеющихся технологий. Хотя такие технические достижения, как беспилотный автомобиль, управляемый, в том числе с использованием методов компьютерного зрения, оказываются возможными, проблема семантической пропасти

[8], заключающаяся в трудности перехода от пиксельного представления изображений к их словесному описанию, остается далекой от разрешения. Как результат, многие задачи, связанные с пониманием изображений, остаются без решения, что свидетельствует о том, что для расширения сферы применения систем компьютерного зрения необходимо решение теоретических проблем.

Одной из основных характеристик методов компьютерного зрения является используемое в них представление (т.е. формальный способ описания) изображений. В настоящей работе проводится анализ типов представлений изображений, используемых в методах компьютерного зрения. Целью работы является установление основных ограничений используемых представлений и возможностей преодоления этих ограничений.

Анализ представлений изображений в прикладных системах компьютерного зрения

Существующие практические методы [9] используют представления разных уровней – пиксельного, контурного, структурного (рисунок). Однако, проанализировав эти методы, можно убедиться, что даже наиболее высокоуровневые описания изображений в значительной части получаются путем применения одного оператора с последующим пороговым ограничением или поиском локальных максимумов, т.е. эти описания строятся не в качестве верхнего уровня иерархических представлений. Подобный подход приводит к простоте реализации и вычислительной эффективности указанных методов. Однако можно предположить, что эта же особенность используемых представлений является причиной их низкой выразительной силы (или потери значимой информации при описании изображений в рамках этих представлений), что приводит к ограниченности соответствующих методов, к примеру, в части их неспособности различать объекты разных классов.

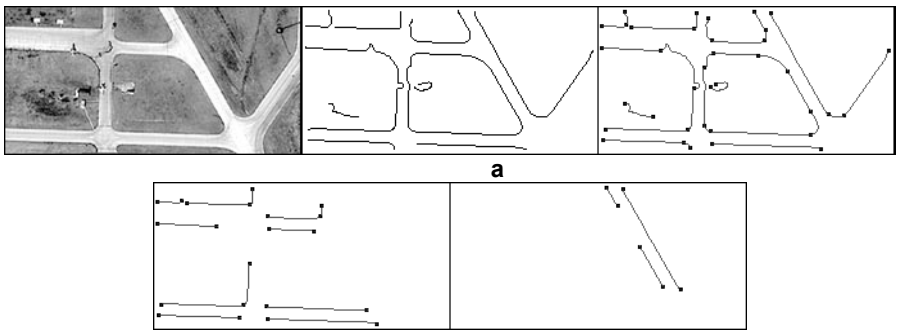


Рисунок. Представление изображения на уровне пикселей, контуров, структурных элементов (а), а также групп структурных элементов (б)

Указанную ограниченность можно проиллюстрировать на примере задач извлечения изображений из баз данных, где разные методы предназначены для применения к изображениям разных типов. Традиционно недостатки отдельных методов компенсируются их совместным использованием. К примеру, в конкурсе Large Scale Visual Recognition Challenge [10] по распознаванию объектов различных классов на произвольных изображениях предложенные решения редко опираются на какой-то один метод, а вместо этого используют комбинации различных методов выделения ключевых точек и признаков и композиции классификаторов, что может быть видно по описанию методов-победителей, приведенных на сайте конкурса. Такой подход позволяет в какой-то мере увеличить количество распознаваемых классов, но оно по-прежнему остается несопоставимым с возможностями человека.

Зоны зрительной коры человека также анализируют разные аспекты изображений – текстуру, цвет, структуру и т.д., что, на первый взгляд, может служить обоснованием «модульного» подхода к построению систем компьютерного зрения. Однако в дополнение к разделению на подобные каналы (которое в человеческой зрительной системе не столь однозначно) не вызывает сомнения и иерархичность организации зрительной системы с обильными обратными связями между уровнями.

Методы распознавания или извлечения изображений из баз строят отдельные описания для каждого типа информации, скажем, цветовые гистограммы, ключевые точки с текстурными дескрипторами, признаки формы (например, в виде гистограммы внутренних расстояний) и т.д. В лучшем случае детекторы и дескрипторы ключевых точек обобщаются для использования цветных изображений. Однако в остальном описания составляются как простые объединения признаков разных типов и не формируют целостной модели изображения, т.е. такой модели, по которой можно было бы реконструировать исходное изображение. В то же время, очевидно, человек не видит изображение как совокупность разрозненных признаков.

При этом составные (гибридные) представления не вполне компенсируют недостатки одноуровневых представлений. К примеру, стандартные дескрипторы ключевых точек не инварианты к нелинейным яркостным преобразованиям. К таким преобразованиям инвариантны, например, гистограммы внутренних расстояний, но в них полностью теряется информация о распределении яркостей пикселей в изобра-

жении объекта, из-за чего метод обладает слабыми дискриминантными свойствами. Прямое объединение двух типов описаний, как правило, позволяет распознавать изображения с выраженными текстурными свойствами в отсутствие нелинейных яркостных изменений, а также изображения объектов с хорошо различимой формой при возможном присутствии нелинейных яркостных изменений, но не какие-либо смешанные случаи. Сходная ситуация наблюдается и при объединении текстурных и цветовых дескрипторов ключевых точек [11].

Объединение двух типов признаков, естественно, повышает размерность пространства признаков и делает некоторые классы образов, не разделимые ни в одном исходном пространстве, разделимыми в объединенном пространстве. Иными словами, повышение дискриминантной силы гибридных методов выходит за рамки простого объединения распознаваемых классов, но несущественно, поскольку распознавание объектов новых классов нередко требует учета новых закономерностей. При этом новые закономерности должны выражаться в форме алгоритмов, которые не сводятся к алгоритмам, строящим элементы описаний в объединяемых методах. Аппроксимация же одного типа регулярностей другим типом регулярностей может требовать экспоненциально большого числа элементов описаний (простейшим примером неограниченного возрастания числа необходимых элементов описания при увеличении требуемой точности может служить аппроксимация экспоненты полиномиальным рядом).

Естественно, не все (хотя и значительное большинство) методы в области компьютерного зрения базируются на одноуровневых представлениях изображений. Методы интерпретации изображений [12] добавляют, по крайней мере, один уровень представления – семантический. Но именно здесь становится наиболее видна проблема семантической пропасти: описания промежуточного уровня (между пиксельным и семантическим) оказываются недостаточно выразительными, чтобы на семантическом уровне с высокой вероятностью назначать метки объектам даже с учетом знания общих правил организации наблюдаемых сцен.

Идея использования иерархических представлений изображений известна давно. Однако достижение их эффективного использования на практике оказывается затруднительно. Сходной была ситуация и в многослойных искусственных нейронных сетях. Долгое время использовались сети с малым числом скрытых слоев (по сути, соответствующих представлениям разных уровней, хотя и однотипных), поскольку связи с дополнительными слоями не удавалось эффективно настраивать в процессе обучения, хотя время обучения и работы увеличивалось. Однако разработка теории сетей глубокого обучения позволила существенно расширить возможности по распознаванию у нейронных сетей именно благодаря использованию многослойной архитектуры [13].

Анализ эффективности иерархических представлений

Для эффективного использования иерархических представлений необходимо четко определить их преимущество перед одноуровневыми представлениями, которое не столь очевидно, поскольку разделение на уровни является отчасти условным. Если не вводить никаких ограничений на возможные классы описаний на одном уровне, то любое иерархическое представление можно трактовать и как одноуровневое. Более того, как давно было замечено [14], если под разделением на уровни подразумевать построение промежуточных описаний, таких, что описание i-го уровня строится на основе описания (i–1)-го уровня, то любому такому иерархическому представлению можно поставить в соответствие представление без явного разделения на уровни, в котором выходное описание, строящееся на основе входных данных, обладает более высоким качеством (например, большей инвариантностью или помехоустойчивостью).

Этот факт следует из байесовского рассмотрения процесса порождения гипотез. Рассмотрим два уровня гипотез. Без принятия промежуточных решений апостериорная вероятность гипотез второго уровня при данных D будет выражаться в форме

$$P(H_2 \mid D) \propto \sum_{H_1} P(H_2 \mid H_1) P(H_1 \mid D), \qquad (*)$$

где $P(H_1 \mid D) \propto P(D \mid H_1) P(H_1)$ и $P(H_2 \mid H_1) \propto P(H_1 \mid H_2) P(H_2)$.

При принятии промежуточных решений суммирование в формуле (*) проводится не по всем возможным гипотезам первого уровня H_1, а только по их некоторому подмножеству, в предельном случае состоящему из одной наиболее вероятной гипотезы:

$$P(H_2 \mid D) \propto \sum_{H_1} P(H_2 \mid H_1) P(H_1 \mid D) \approx P(H_2 \mid H_1^*) P(H_1^* \mid D),$$

где $H_1^* = \arg\max_{H_1} P(H_1 \mid D)$, что позволяет выбирать гипотезу второго уровня по критерию $P(H_2 \mid H_1^*)$. Этот критерий, очевидно, лишь аппроксимирует критерий (*) и может привести к выбору менее вероятной гипотезы второго уровня. В теоретико-информационных терминах снижение эффективности можно выразить через потерю информации при принятии промежуточных решений. В этой связи возникает вопрос: в чем преимущества иерархических представлений?

Можно заметить, что, во-первых, класс одноуровневых представлений совпадает с классом иерархических представлений, только если на представления не накладываются какие-либо существенные ограничения. К примеру, если представления задаются в форме произвольных алгоритмов, то добавление иерархичности не увеличит мощности представлений. Если представления задаются в форме искусственных нейронных сетей произвольной архитектуры, то многослойные сети, составленные из таких сетей, также не будет обладать большей мощностью. Однако если рассматривать ограниченные представления (которые обычно и используются на практике), то введение иерархичности увеличивает их выразительную силу. Например, число нейронов промежуточного слоя в однослойных сетях прямого распространения может расти экспоненциально быстро по сравнению с многослойными сетями при увеличении требуемой точности аппроксимации некоторых закономерностей (а это будет вести к переобучению), что и послужило одной из причин интереса к сетям глубокого обучения [12].

Во-вторых, если задача построения описания в рамках выбранного класса представления является NP-полной, то поиск гипотезы с максимальной апостериорной вероятностью $P(H \mid D)$ будет неосуществим из-за ограничений вычислительных ресурсов. Поиск решения в рамках n-уровневого иерархического представления будет требовать порядка $|\{H_1\}|+\ldots+|\{H_n\}|$ операций, тогда как без принятия промежуточных решений (т.е. при использовании эквивалентного одноуровневого представления) потребуется порядка $|\{H_1\}|\times\ldots\times|\{H_n\}|$ операций. При равных вычислительных затратах на поиск моделей данных мощность используемого множества моделей в случае иерархических представлений будет экспоненциально (по числу уровней) больше, чем в случае одноуровневых представлений (однако при этом не будут гарантированно находиться наиболее вероятные модели). Таким образом, введение иерархической структуры позволяет существенно сокращать вычислительные затраты или увеличить пространство поиска. Например, для перцептронов или сетей глубокого обучения можно было бы использовать алгоритмы обучения, не принимающие в расчет их многоуровневой структуры, а оптимизирующие все связи одновременно. Такая оптимизация могла бы давать наилучший возможный результат обучения сетей с любой архитектурой, если бы она не требовала решения NP-полной задачи большой размерности. При ограниченных вычислительных ресурсах общими алгоритмами оптимальное решение может быть найдено только с очень низкой вероятностью.

Если рассматривать процесс анализа изображений не как процесс поиска моделей источника информации, а как процесс преобразования данных, то ограничения неиерархических представлений можно описать в иных терминах, а, именно, в терминах информационного расстояния между входным изображением и результатом его обработки. Введем это понятие в рамках алгоритмической теории информации, где алгоритмическая сложность строки данных определяется как длина кратчайшего алгоритма, воспроизводящего эти данные: $K(D) = \arg\min\limits_{U(\mu)=D} l(\mu)$, где $l(\mu)$ – длина программы μ для универсальной машины U, воспроизводящей данные D.

Информационная дистанция перехода от данных D к гипотезе H может быть введена как условная алгоритмическая сложность

$$K(H \mid D) = \arg\min_{U(\mu D)=H} l(\mu),$$

где программе μ на вход подаются данные D.

Затруднительно дать конкретную количественную оценку требуемого информационного расстояния для задач обработки изображений или компьютерного зрения (например, информационного расстояния от стереопары до карты дальностей), но очевидно, что каждая задача характеризуется некоторым ненулевым минимальным расстоянием, отделяющим входные изображения от результатов их анализа. Если сложность алгоритмов анализа изображений на каждом уровне представления для некоторой задачи ограничена, то в случае одноуровневых представлений эта задача может оказаться не решаемой.

Введение иерархических представлений при решении NP-полных задач является эвристикой, заключающейся в независимом поиске частей общего решения, что эквивалентно аппроксимации критерия качества решения. Точность этой аппроксимации можно варьировать путем варьирования числа гипотез каждого уровня, передаваемых на следующий уровень. Даже если система компьютерного зрения использует иерархические представления, зачастую число передаваемых гипотез мало или просто равно единице.

Точность аппроксимации может быть увеличена с помощью введения обратных связей от верхних уровней к нижним. Суть этих связей заключается в следующем. Нас интересует наиболее точная аппроксимация суммы (*) наименьшим числом слагаемых для выбора лучшей гипотезы верхнего уровня. В отсутствие априорных ограничений на гипотезы второго уровня H_2 число слагаемых в (*) можно уменьшить за счет выбора слагаемых с наибольшим весом $P(H_1 \mid D)$. Однако после выбора некоторого количества наилучших гипотез второго уровня можно провести повторный отбор гипотез первого уровня уже с учетом весов $P(H_2 \mid H_1)$. Этот итеративный процесс может продолжаться далее. На каждой итерации может отбираться фиксированное число пар гипотез (H_1, H_2) с наибольшими произведениями $P(H_2 \mid H_1)P(H_1 \mid D)$, что даст гарантию сходимости процесса.

Рассмотренные принципы построения иерархических описаний с использованием обратных связей в теории могут позволить достичь компромисса между вычислительной эффективностью и качеством решения. В настоящее время, однако, методы, реализующие данные принципы, плохо развиты в силу своей технической сложности, несмотря на свою потенциальную востребованность. В качестве примера можно привести проблему обнаружения протяженных низкоконтрастных контуров, требующую для своего решения построения не только контурного, но и структурного описания изображений, причем с введением обратных связей между уровнями, как раз и позволяющих выделять контуры с низким значением $P(H_1 | D)$, но высоким значением $P(H_2 | H_1)$.

Заключение

Рассмотрение прикладных методов, широко используемых в компьютерном зрении, показало, что для них характерно выполнение анализа изображений на одном уровне абстракции. Анализ неиерархических представлений изображений позволяет выявить их недостатки, которые можно выразить в различных терминах – ограниченной выразительной силе, вычислительной неэффективности или ограниченном информационном расстоянии между результатом обработки и исходным изображением.

Указанные недостатки могут быть устранены с помощью использования иерархических представлений. Хотя иерархические представления дают лишь приближенное решение задачи интерпретации изображений, с введением обратных связей между уровнями построения описаний изображений они позволяют достичь компромисса между вычислительной сложностью и качеством решения. В настоящее время успешными оказались иерархические системы лишь на основе простых однородных представлений информации, характерных для искусственных нейронных сетей. Иерархические системы компьютерного зрения, включающие контурные и промежуточные символьные представления, обладающие большой выразительной силой, разрабатывались давно, но до настоящего времени успешных решений, переносимых на различные задачи, не получено. Создание таких систем является перспективным направлением развития компьютерного зрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Исследования одного из авторов (А.С. Потапова) поддержаны грантом МД-1072.2013.9.

Литература

1. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // Int. J. of Computer Vision. – 2004. – V. 60. – № 2. – P. 91–110.
2. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features // Proc. 9th European Conf. on Computer Vision. Graz, Austria. – 2006. – V. 3951. – P. 404–417.
3. Тропченко А.А., Тропченко А.Ю. Нейросетевые методы идентификации человека по изображению лица // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 10. – С. 31–36.
4. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – V. 1. – P. 886–893.
5. Csurka G., Dance C., Fan L.X., Willamowski J., Bray C. Visual categorization with bags of keypoints // Proc. of ECCV International Workshop on Statistical Learning in Computer Vision. – 2004. – P. 1–22.
6. Hirschmuller H. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2008. – V. 30. – № 2. – P. 328–341.
7. Дырнаев А.В., Потапов А.С. Комбинированный метод подсчета эритроцитов на изображениях мазков крови // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 1 (77). – С. 19–23.
8. Martens G., Lambert P., Van de Walle R. Bridging the semantic gap using human vision system inspired features // Self-Organizing Maps. – 2010. – P. 261–276.
9. Васильев В.Н., Гуров И.П., Потапов А.С. Современная видеоинформатика: проблемы и перспективы // Оптический журнал. – 2012. – Т. 79. – № 11. – С. 5–15.
10. Large Scale Visual Recognition Challenge – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.image-net.org/challenges/LSVRC/2012/, свободный. Яз. англ. (дата обращения 26.08.2013).
11. Иванов П.И., Маничев А.Э., Потапов А.С. Методы выделения контуров и описания ключевых точек при сопоставлении цветных изображений // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 11. – С. 43–50.
12. Rares A., Reinders M.J.T., Hendriks E.A. Image Interpretation Systems // Technical Report (MCCWS 2.1.1.3.C), MCCWS project, Information and Communication Theory Group. TU Delft. – 1999. – 32 p.
13. Bengio Y. Learning Deep Architectures for AI // Foundations and Trends in Machine Learning. – 2009. – V. 2. – № 1. – P. 1–127.
14. Павлидис Т. Иерархические методы в структурном распознавании образов // ТИИЭР. – 1979. – Т. 67. – № 5. – С. 39–49.

Васильев Владимир Николаевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ректор, vasilev@mail.ifmo.ru

Гуров Игорь Петрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, gurov@mail.ifmo.ru

Потапов Алексей Сергеевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, профессор, доктор технических наук, pas.aicv@gmail.com

УДК 581.787:[519.6+517.443]

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСИИ

М.А. Волынский, И.П. Гуров

При формировании сигналов в спектральной оптической когерентной томографии при наличии дисперсии в среде спектральные интерференционные полосы испытывают частотную модуляцию из-за зависимости частоты полос от длины волны, что приводит к уширению спектра регистрируемого сигнала и ухудшению разрешающей способности спектрального интерферометра. В работе предложен метод динамической обработки данных спектральной интерференции на основе алгоритма дискретной линейной фильтрации Калмана с компенсацией влияния дисперсии в среде на разрешающую способность при исследовании оптически неоднородных частично прозрачных объектов. Алгоритм состоит в идентификации параметров (амплитуды и начальной фазы) гармонических составляющих интерференционного сигнала с фиксированным набором частот с помощью дискретного линейного фильтра Калмана. Использование информации о начальной фазе позволяет скомпенсировать влияние дисперсии и устранить нежелательные артефакты, что дает возможность повысить разрешающую способность спектральной оптической когерентной томографии. Представлены результаты обработки одномерных и двумерных сигналов в спектральной оптической когерентной томографии на примере исследования случайно-неоднородных рассеивающих сред в биомедицине.

Ключевые слова: спектральная интерферометрия, оптическая когерентная томография, компенсация дисперсии в среде, преобразование Фурье, фильтр Калмана.

Введение

Методы бесконтактного контроля внутренней микроструктуры объектов необходимы для многих областей науки и техники. Одним из таких методов является оптическая когерентная томография (ОКТ), получившая распространение в целях неинвазивной диагностики объектов в биомедицине [1, 2]. Как известно, принцип ОКТ может быть реализован при использовании корреляционного или спектрального интерферометра [1–4]. В корреляционном интерферометре осуществляют перемещение оптической системы относительно исследуемого объекта. При этом интерференционные полосы малой когерентности формируются в пределах длины когерентности излучения при интерференции части измерительной волны, отраженной от поверхности непрозрачного объекта или от слоя частично прозрачного неоднородного объекта, находящихся от светоделителя на расстоянии, равном оптической длине пути опорной волны. В спектральном интерферометре оптическая длина пути опорной волны не равна оптической длине пути измерительной волны для всего диапазона высот рельефа непрозрачного объекта или глубины частично прозрачного объекта. На выходе интерферометра размещен спектральный прибор, позволяющий определить составляющую отраженной измерительной волны для различных длин волн. При этом, используя преобразование Фурье-спектра, зарегистрированного фотодетектором, можно определить расстояние и степень отражения от каждого слоя [4].

При наличии дисперсии в среде спектральные интерференционные полосы испытывают частотную модуляцию из-за зависимости частоты полос от длины волны, что приводит к уширению спектра регистрируемого сигнала и ухудшению разрешающей способности спектрального интерферометра.

Традиционный метод обработки данных в спектральной ОКТ основан на преобразовании Фурье (см., например, [4]). При этом для компенсации влияния дисперсии требуется точное определение амплитуд, частот и фаз информативных составляющих спектра сигнала, которое оказывается возможным только при регистрации полной реализации сигнала во всем диапазоне длин волн перед обработкой данных [5, 6], что снижает быстродействие системы. Повышение быстродействия возможно при получении динамических оценок параметров сигнала при рекуррентной обработке данных в системах спектральной ОКТ с перестраиваемой длиной волны источника излучения на основе фильтрации Калмана [7]. Алгоритм рекуррентной обработки данных в системах спектральной ОКТ предложен в [8, 9]. В настоящей работе рассматривается модифицированный метод динамической обработки сигналов спектральной интерференции на основе фильтра Калмана с возможностью повышения разрешающей способности за счет компенсации влияния дисперсии в среде.

Основы метода спектральной оптической когерентной томографии

В спектральной интерферометрии регистрируют сигналы, пропорциональные значениям интенсивности [4], т.е.

$$I(\sigma) = G(\sigma)\left| a_R \exp(j2\sigma r) + \int_0^L a(z)\exp\{j2\sigma[r + n(z)z]\}dz \right|^2, \quad (1)$$

где $G(\sigma)$ – спектр источника излучении; a_R – амплитуда опорной волны; $j = \sqrt{-1}$; $\sigma = 2\pi/\lambda$ – волновое число, определяемое длиной волны λ; $2r$ – оптическая длина пути опорной волны; $a(z)$ – амплитуда предметной волны, отраженной на глубине z в исследуемом образце в диапазоне глубин L; $n(z)$ – изменение показателя преломления по глубине среды. Полезная информация содержится в значениях $a(z)$, характеризующих степень отражения предметной волны по глубине исследуемой среды; их необходимо определить в результате обработки полученных значений $I(\sigma)$.

В результате нормировки выражения (1) относительно спектра источника излучения интерферометрический сигнал в спектральной ОКТ определяется в области волновых чисел формулой (см., например, [5, 6])

$$S(\sigma) = \left| 1 + \int_0^\infty a(z)\exp[j2\sigma n_0 z + j\varphi_d(\sigma)]dz \right|^2, \quad (2)$$

где $n_0 = \text{const}$ – эффективный показатель преломления в среде; φ_d – начальная фаза каждой из гармонических составляющих сигнала, обусловленная дисперсией в среде (для среды без дисперсии $\varphi_d = 0$).

Обозначим $A(\sigma)$ интеграл под модулем в выражении (2). Стандартный метод вычисления искомой амплитуды отраженной волны $a(z)$ состоит в применении обратного преобразования Фурье к выделенной информативной составляющей $A(\sigma)$ сигнала $S(\sigma)$:

$$a(z) = \int_0^\infty A(\sigma)\exp(-j2\sigma n_0 z)d\sigma. \quad (3)$$

Заметим, что преобразование (3) является непараметрическим, поскольку позволяет получать результаты независимо от вида (параметров) преобразуемой функции $A(\sigma)$.

Величину $A(\sigma)$ можно рассматривать как набор отдельных гармонических составляющих, определяемых параметрами – частотой, амплитудой и начальной фазой. При этом задача сводится к параметрической идентификации и может быть решена с помощью линейной фильтрации Калмана [8, 9]. Алгоритм дискретной фильтрации Калмана основан на рекуррентной процедуре предсказания значения сигнала на последующий шаг на основе информации, имеющейся на предыдущем шаге, с учетом известной параметрической модели сигнала и использовании ошибки предсказания для уточнения значений параметров. Применительно к спектральной интерферометрии это позволяет выбирать требуемое количество длин волн, обеспечивающее необходимую разрешающую способность и быстродействие.

Алгоритм обработки данных

Для описания алгоритма обработки данных перейдем к их дискретному представлению и введем номер дискретного отсчета $k = 0\ldots K–1$ в области волновых чисел, причем $\sigma_k = k\Delta\sigma$, где $\Delta\sigma$ – шаг изменения волнового числа.

Пусть имеется последовательность отсчетов $A(k) = A(\sigma_k)$ сигнала спектральной интерференции и решается задача рекуррентной идентификации гармонической составляющей с некоторой фиксированной частотой f. В случае модели сигнала вида

$$H(k) = u\cos(2\pi fk\Delta\sigma - \varphi), \quad (4)$$

где φ – начальная фаза на частоте f, алгоритм рекуррентной идентификации наличия составляющей с частотой f сводится к фильтрации параметров – амплитуды u и начальной фазы φ гармонического сигнала. Модель (4) может быть представлена в виде

$$H(k) = u_c\cos(2\pi fk\Delta\sigma) + u_s\sin(2\pi fk\Delta\sigma), \quad (5)$$

а искомые амплитуда u и начальная фаза φ определяются как

$$u = \sqrt{u_c^2 + u_s^2}, \quad (6)$$

$$\varphi = \text{arctg}(u_s / u_c). \quad (7)$$

С учетом сказанного, поиск амплитуды и начальной фазы гармонической составляющей сигнала для каждой частоты f сводится к оцениванию значений u_c и u_s с уточнением оценки при поступлении каждого отсчета сигнала k. Введем вектор параметров $\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_c & u_s \end{pmatrix}^T$. Тогда выражение для априорной оценки этого вектора параметров можно записать на k-ом шаге обработки в виде

$$\bar{\mathbf{u}}(k) = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{u}(k-1), \tag{8}$$

где вектор коэффициентов $\boldsymbol{\alpha}$ задает линейный закон изменения амплитуд (при малых приращениях $\Delta\sigma$ можно считать, что $\alpha = 1$). Апостериорная коррекция осуществляется на основе невязки предсказания и наблюдения:

$$\tilde{\mathbf{u}}(k) = \bar{\mathbf{u}}(k) + \mathbf{P}(k)[H_{obs}(k) - \bar{H}(k)]. \tag{9}$$

Для вычислений по формуле (9) требуется определить коэффициент усиления $\mathbf{P}(k) = \mathbf{R}\mathbf{C}^T(k)[\mathbf{C}(k)\mathbf{R}\mathbf{C}^T(k) + \mathbf{R}_n]^{-1}$, где $\mathbf{R}$ – ковариационная матрица ошибки априорной оценки параметров; $\mathbf{R}_n$ – дисперсия шума наблюдения; $\mathbf{C}(k)$ – матрица перехода, элементы которой являются производными модели (5) по параметрам, $\mathbf{C}(k) = H'_{\mathbf{u}}(k)$, $\bar{H}(k)$ – прогноз наблюдения, получаемый подстановкой предсказанных параметров в модель (5).

Если шаг дискретизации $\Delta\sigma$ отнормировать и принять равным единице, алгоритм фильтрации (8)–(9) сведется к следующему рекуррентному выражению:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{R}\mathbf{C}^T(k)[\mathbf{C}(k)\mathbf{R}\mathbf{C}^T(k) + \mathbf{R}_n]^{-1}[H_{obs}(k) - \bar{H}(k)], \tag{10}$$

где

$$\mathbf{C}(k) = \begin{pmatrix} \cos(2\pi fk) \\ \sin(2\pi fk) \end{pmatrix}^T, \tag{11}$$

$$\bar{H}(k) = u_c(k-1)\cos(2\pi fk) + u_s(k-1)\sin(2\pi fk). \tag{12}$$

Следует отметить, что на каждом шаге фильтрации возможен пересчет ковариационной матрицы $\mathbf{R}$ согласно выражению [5]

$$\mathbf{R}(k) = [\mathbf{J} - \mathbf{P}(k)\mathbf{C}(k)]\mathbf{R}(k-1), \tag{13}$$

где $\mathbf{J}$ – единичная матрица. Использование (13) позволяет дополнительно повысить скорость сходимости алгоритма, однако увеличивает вычислительную сложность.

Из выражения (3) видно, что $a(z)$ может быть представлена в виде набора δ-функций,

$$a(z) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i \delta(z - z_i), \tag{14}$$

соответствующих гармоническим составляющим спектра и характеризующих положение слоев исследуемой среды на глубине z_i, что эквивалентно представлению в частотной области (области длин волн) в виде M гармонических составляющих. С учетом выражения (14) возможна одновременная идентификация этих составляющих при использовании параллельной обработки (см. [9]).

В качестве примера работы алгоритма (10)–(13) на рис. 1, а, представлен исходный сигнал со следующими параметрами: нормированная частота $f = 0{,}01$, амплитуда 10 усл. ед., начальная фаза 2 рад, аддитивный белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией 1 усл. ед. На рис. 1, б, в, представлены результаты оценивания параметров гармонической составляющей при использовании рассмотренного выше рекуррентного алгоритма. Видно, что после примерно 100 отсчетов (один период сигнала) оценки выходят на квазистационарные значения, соответствующие истинным. Незначительные флуктуации оценок обусловлены наличием шума наблюдения с ненулевой дисперсией, что имеет место в реальных сигналах. Из гистограмм ошибок оценок амплитуды и фазы (рис. 1, д, е) видно, что они имеют одномодовый характер с нулевым математическим ожиданием и близки к гауссовской форме.

Поскольку для каждого сигнала оцениваемые параметры – константы, а их оценки принимают квазистационарные значения в пределах одного периода сигнала, при реализации алгоритма (10)–(13) используется критерий останова, предложенный в работе [8]. Указанный критерий основан на определении разности оценок амплитуды сигнала с заданной частотой на текущем k и предыдущем $k-1$ отсчетах и сравнении с некоторым пороговым значением ε. Тогда критерий останова выражается в форме

$$u(k) - u(k-1) < \varepsilon. \tag{15}$$

Выбор порогового значения ε может осуществляться различными способами и зависит от представления исходного сигнала. Если значения сигнала принадлежат множеству действительных чисел, то в качестве ε целесообразно выбирать среднее квадратичное отклонение шума наблюдения. В системах ОКТ исходные данные, как правило, представляют собой изображения, представленные 256 или 4096 градациями серого для 8- и 12-битного представления соответственно. В этом случае в качестве ε целе-

сообразно выбирать минимально возможное изменение градаций серого. Особенности выбора критерия (15) рассмотрены в работах [8, 9].

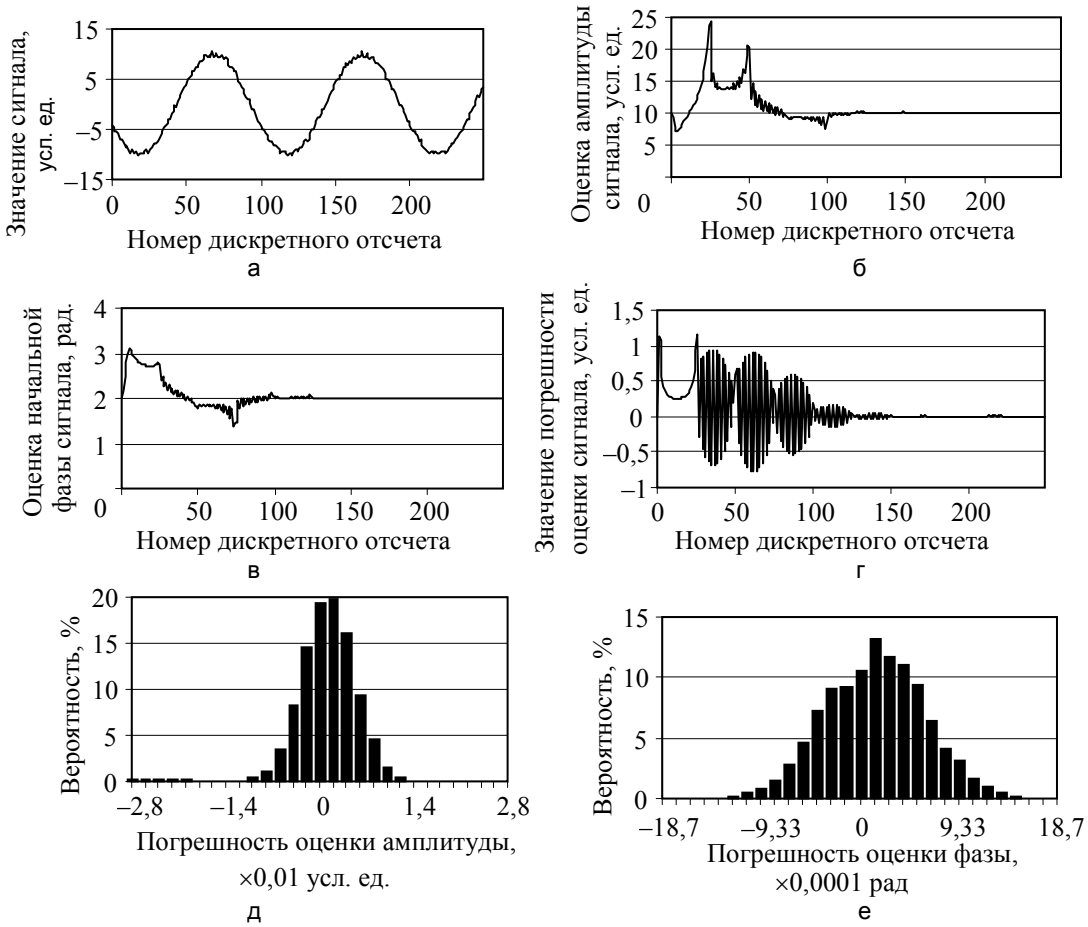


Рис. 1. Исходный сигнал с частотой f = 0,01 (а), оценки амплитуды (б) и начальной фазы (в), погрешность предсказания значения сигнала (г) и гистограммы ошибок предсказания амплитуды (д) и начальной фазы (е) для 10^4 реализаций сигнала

Найденные в (6) и (7) значения амплитуд и начальных фаз могут быть использованы для компенсации влияния дисперсии в среде [5, 6]. Следует отметить, что начальные фазы для гармонических составляющих с амплитудой, близкой к нулю, не имеют физического смысла, поэтому целесообразно ввести пороговое значение оценки амплитуды (например, незначительно превышающее среднее квадратичное отклонение шума наблюдения) и считать начальные фазы гармонических составляющих с амплитудой, меньшей этого порогового значения, равными нулю. Значение начальной фазы для гармонических составляющих с ненулевой амплитудой может быть использовано для компенсации влияния дисперсии в среде с помощью алгоритма, предложенного в работе [5].

Как отмечается в [5], из-за влияния дисперсии происходит уширение полос в спектре интерферометрического сигнала, причем истинному положению полосы соответствует нулевая производная начальной фазы. С учетом этого можно ввести коэффициент пропорциональности на основе найденных значений начальной фазы на каждой частоте и корректировать амплитуду А-скана в соответствии с выражением

$$\hat{a}(z) = \left(1 - \frac{1}{\Delta\sigma}\frac{d\varphi(z)}{dz}\right)a(z), \qquad (16)$$

где $\hat{a}(z)$ – скорректированная с учетом влияния дисперсии амплитуда.

В качестве примера на рис. 2, а, показан сигнал спектральной интерференции, полученный при исследовании двухслойного фантома из поливинилхлорида [10] с помощью спектрального оптического когерентного томографа Hyperion (ThorLabs, США) с источником излучения с центральной длиной волны 930 нм [11]. На рис. 2, б, показан результат обработки с компенсацией дисперсии и без компенсации. Видно, что наличие дисперсии в среде уширяет линии в спектре сигнала, а поправка (16) на основе учета значений начальной фазы позволяет скомпенсировать этот эффект, повышая, тем самым, разрешающую способность по глубине. Толщина верхнего слоя в фантоме при его изготовлении составляла около 100 мкм, что иллюстрируется на рис. 2, б.

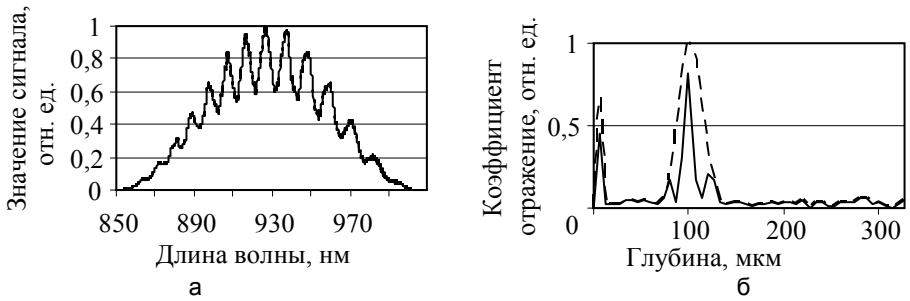


Рис. 2. Сигнал спектральной интерференции (а) и полученный из него А-скан (б) с компенсацией дисперсии (сплошная линия) и без компенсации (пунктирная линия)

Обработка биомедицинских данных

На рис. 3 показан пример В-скана кожи на подушечке указательного пальца человека, полученный с помощью описанного в настоящей работе метода без учета начальных фаз (рис. 3, а, б) и с компенсацией дисперсии (рис. 3, в, г). Видно, что без учета начальных фаз на реконструируемых В-сканах присутствуют артефакты в виде вертикальных полос, вызванные уширением полосы частот, соответствующей каждой глубине объекта, вследствие влияния дисперсии в среде. На рис. 3, в, г, указанные артефакты отсутствуют.

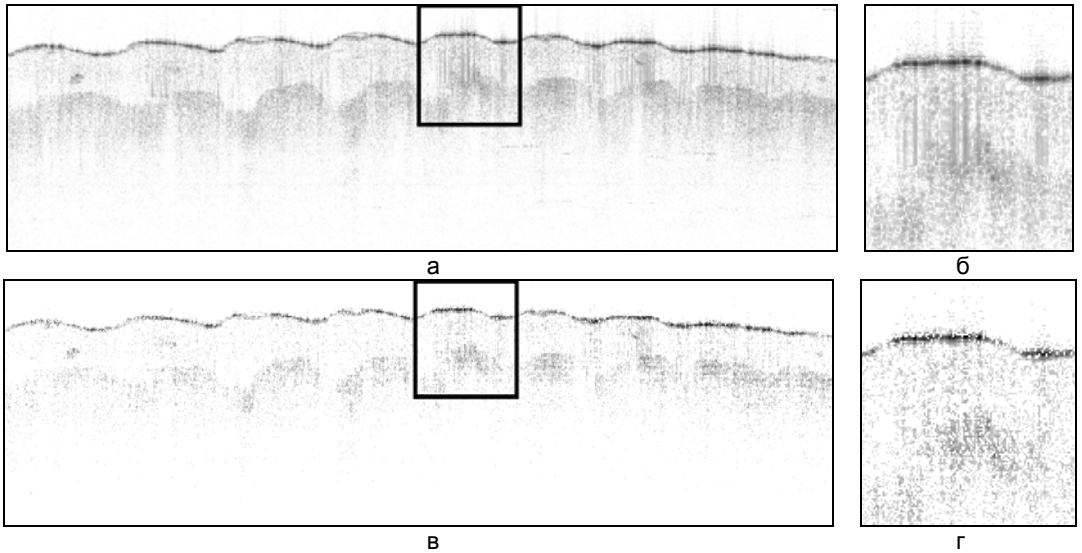


Рис. 3. В-скан кожи на подушечке указательного пальца человека, восстановленный без учета влияния дисперсии (а)–(б) и с компенсацией дисперсии (в)–(г)

Заключение

В системах спектральной оптической когерентной томографии с перестраиваемой длиной волны актуальна возможность компенсации влияния дисперсии среды на получаемые изображения. Для повышения быстродействия и достоверности результатов в системах спектральной оптической когерентной томографии предложен алгоритм обработки данных на основе линейного фильтра Калмана, позволяющий проводить идентификацию частот из заданного набора в сигнале и определять их параметры (амплитуду и начальную фазу). Использование информации о начальной фазе позволяет скомпенсировать влияние дисперсии и устранить нежелательные артефакты, возникающие при реконструкции В-сканов, что позволяет повысить разрешающую способность спектральной оптической когерентной томографии.

Апробация алгоритма при анализе биомедицинских данных демонстрирует адекватность предложенного метода и его применимость в системах спектральной оптической когерентной томографии с использованием современных источников излучения и повышенным быстродействием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. Tomlins P.H., Wang R.K. Theory, developments and applications of optical coherence tomography // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2005. – V. 38. – P. 2519–2535.

2. Drexler W., Fujimoto J.G. eds. Optical Coherence Tomography. Technology and Applications. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 1346 p.
3. Волынский М.А., Воробьева Е.А., Гуров И.П., Маргарянц Н.Б. Бесконтактный контроль микрообъектов методами интерферометрии малой когерентности и оптической когерентной томографии // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 2. – С. 75–82.
4. Häusler G., Lindner M.V. «Coherence radar» and «Spectral radar» – new tools for dermatological diagnostics // J. Biomed. Opt. – 1998. – V. 3. – P. 21–31.
5. Hillmann D., Bonin T., Lührs C., Franke G., Hagen-Eggert M., Koch P., Hüttmann G. Common approach for compensation of axial motion artifacts in swept-source OCT and dispersion in Fourier-domain OCT // Opt. Expr. – 2012. – V. 20. – № 6. – P. 6761–6776.
6. Lippok N., Coen S., Nielsen P., Vanholsbeeck F. Dispersion compensation in Fourier domain optical coherence tomography using the fractional Fourier transform // Opt. Expr. – 2012. – V. 20. – № 21. – P. 233981–23413.
7. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Trans. ASME, J. Basic Eng. – 1960. – V. 82. – P. 35–45.
8. Волынский М.А., Гуров И.П. Рекуррентная обработка данных в спектральной оптической когерентной томографии на основе фильтрации Калмана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 40–44.
9. Gurov I., Volynsky M. Recurrence signal processing in Fourier-domain optical coherence tomography based on linear Kalman filtering // Proc. SPIE. – 2013. – V. 8792. – P. 879203-1–879203-6.
10. Быков А.В., Волков М.В., Волынский М.А., Гуров И.П., Киннунен М., Маргарянц Н.Б., Попов А.П. Изготовление тканеимитирующих фантомов и капилляров и их исследование методом оптической когерентной томографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 54–59.
11. Спецификация прибора Hyperion на сайте компании ThorLabs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5701, свободный. Яз. англ. (дата обращения 11.09.2013).

Волынский Максим Александрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, maxim.volynsky@gmail.com

Гуров Игорь Петрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, gurov@mail.ifmo.ru

4 АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 681.51

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ИНТЕРВАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИ РЕГУЛЯЦИИ ГОРМОНА ТЕСТОСТЕРОНА[1]

Д.В. Ефимов, А.С. Кремлев, Т.А. Харьковская, С.Г. Чеботарев

Работа посвящена построению интервального наблюдателя для нелинейных систем с переменными параметрами в предположении, что вектор изменяющихся параметров недоступен для измерений. Показано, что наблюдатель позволяет получить область оценок переменных состояния системы, гарантированно содержащую фактическое значение состояния в данный момент времени. Эффективность подхода продемонстрирована с помощью компьютерного моделирования системы регуляции гормона тестостерона.

Ключевые слова: наблюдатель, интервальная оценка, неопределенность, системы с переменными параметрами, нелинейные системы, кооперативность.

Введение

Гормональная регуляция – сложный процесс, в котором уровни различных гормонов связаны между собой внутренними обратными связями [1, 2]. При описании динамики уровня гормонов учитывают два процесса: освобождение гормона, что приводит к понижению его уровня, и секреция гормона. Скорость освобождения в основном зависит от уровня самого гормона, скорость секреции обусловлена уровнем и динамикой связанных гормонов. Повышение уровня других гормонов может либо стимулировать секрецию данного гормона, либо подавлять ее. Таким образом, между уровнями различных гормонов имеет место либо положительная, либо отрицательная обратная связь. Цепочка взаимодействующих гормонов является замкнутой, что обеспечивает гомеостазис организма. Для коррекции этого процесса может использоваться внешняя обратная связь – медикаментозное или иное лечение, специальное питание.

Существует несколько работ, посвященных математическим содержательным моделям, описывающим динамику данной цепочки гормонов [3, 4]. Этические соображения не позволяют непосредственно измерять уровень некоторых гормонов цепочки у человека, но из опытов на животных известно, что их секреция под воздействием связанных гормонов и внешних факторов имеет колебательный, причем импульсный характер [1, 5].

Исходя из этого, построение классического устройства оценки представляется невозможным, но можно оценить интервал, в котором бы находился уровень концентрации гормонов в любой момент времени. Данная работа исследует теорию интервального оценивания, с помощью которой можно построить интервальный наблюдатель для заданной системы регуляции гормона и оценить уровни неизмеряемых концентраций гормонов.

Постановка задачи

В некоторых случаях использование классических методов построения наблюдателей, оценки которых сходятся к точному значению состояния при отсутствии шума, невозможно. Однако в таких случаях возможно использование методов интервальной оценки, т.е. методов построения интервального наблюдателя, который вычисляет множества допустимых значений для вектора состояний системы и генерирует два вектора оценок – минимальных и максимальных значений для каждого элемента вектора состояний объекта. Размер рассчитанного множества должен быть пропорционален неопределенности модели объекта. Неопределенности рассматриваются как детерминированные, но неизвестные функции времени. С этими ограничениями на параметры можно оценить границы ненаблюдаемых переменных.

Существует несколько подходов к построению интервальных наблюдателей [6–9]. Эта работа рассматривает и продолжает подход к построению интервальных наблюдателей, основанных на теории монотонных систем [8–12]. Одним из самых сложных допущений для построения интервального наблюдателя является требование кооперативности динамики ошибки интервальной оценки, которое было рассмотрено в работах [11, 13–16].

Целью настоящей работы является предложение некоторых предварительных результатов по построению интервальных наблюдателей для нелинейных систем с неизмеримыми переменными параметрами. Результат продемонстрирован на примере компьютерного моделирования системы регуляции гормона тестостерона.

[1] Статья написана при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-464.2013.8

Общие сведения

Для матрицы $\mathbf{A} \in R^{m\times n}$ определим $\overline{\mathbf{A}} \in \max\{0, \mathbf{A}\}$, $\mathbf{A} = \overline{\mathbf{A}} - \mathbf{A}$. Запись $\mathbf{A} \in M$ означает, что матрица **A** – мецлерова, т.е. имеет неотрицательные элементы вне главной диагонали.

Лемма 1. Пусть $\mathbf{x} \in R^n$ будет вектором переменных, $\underline{\mathbf{x}} \le \mathbf{x} \le \overline{\mathbf{x}}$ для некоторых $\underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}} \in R^n$, и $\mathbf{A} \in R^{m\times n}$ будет постоянной матрицей, тогда

$$\overline{\mathbf{A}}\underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{A}}\overline{\mathbf{x}} \le \mathbf{A}\mathbf{x} \le \overline{\mathbf{A}}\overline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{A}}\underline{\mathbf{x}}.$$

Доказательство. Отметим, что $\mathbf{A}\mathbf{x} = \left(\overline{\mathbf{A}} - \underline{\mathbf{A}}\right)\mathbf{x}$, что для $\underline{\mathbf{x}} \le \mathbf{x} \le \overline{\mathbf{x}}$ дает необходимые оценки.

Матрица $\mathbf{A} \in R^{m\times n}$ называется гурвицевой, если все ее собственные значения имеют отрицательную вещественную часть. Любое решение линейной системы

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \omega(t), \omega : R_+ \to R_+^n,$$

с $\mathbf{x} \in R^n$ и мецлеровой матрицей **A** поэлементно неотрицательно для всех $t \ge 0$ при условии, что $\mathbf{x}(0) \ge 0$. Такие динамические системы называются кооперативными [17, 18].

Лемма 2. Даны матрицы $\mathbf{A} \in R^{n\times n}$, $\mathbf{R} \in R^{n\times n}$ и $\mathbf{C} \in R^{p\times n}$. Если существует матрица $\mathbf{L} \in R^{n\times p}$ – такая, что матрицы **A–LC** и **R** имеют одинаковые собственные значения, тогда $\mathbf{R} = \mathbf{S}^{-1}(\mathbf{A}-\mathbf{LC})\mathbf{S}$, где матрица $\mathbf{S} \in R^{n\times n}$ при условии, что пары (**A–LC**, $\mathbf{e}_1$) и (**R**, $\mathbf{e}_2$) наблюдаемы для некоторых $\mathbf{e}_1 \in R^{1\times n}$, $\mathbf{e}_2 \in R^{1\times n}$.

Этот результат был использован в [11] для построения интервальных наблюдателей для линейных стационарных систем с мецлеровой матрицей **R**.

Построение интервального наблюдателя

Рассмотрим следующий вид системы, имеющей зависимость от неизвестных нестационарных параметров $\zeta(t) \in \Theta$:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t,\mathbf{y},\mathbf{u})\mathbf{x}(t) + f(t,\mathbf{y},\mathbf{u},\zeta); \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t,\mathbf{u})\mathbf{x}(t), \end{cases} \tag{1}$$

где $\mathbf{x}(t) \in R^n$ – состояние, $\mathbf{y}(t) \in R^p$ – выходная переменная, $\mathbf{u}(t) \in R^m$ – известное входное воздействие, $\zeta(t) \in R^q$ – неизвестное входное воздействие или неизвестные изменяющиеся параметры $\zeta(t) \in \Theta \quad \forall t \ge 0$, множество Θ известно. Отметим, что

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\zeta)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\zeta)\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{x} + f(t,\mathbf{u},\zeta);\ f(t,\mathbf{u},\zeta) = \left[\mathbf{A}(\zeta) - \mathbf{A}\right]\mathbf{x} + \mathbf{B}(\zeta)\mathbf{u}.$$

Допущение 1. $\|\mathbf{x}\| \le \mathbf{X}$, $\|\mathbf{u}\| \le \mathbf{U}$ и $\|\mathbf{y}\| \le \mathbf{Y}$, границы **X**>0, **U**>0, **Y**>0 заданы.

Допущение 2. Пусть $\underline{\mathbf{x}} \le \mathbf{x} \le \overline{\mathbf{x}}$ для некоторых $\underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}} \in R^n$, тогда $\underline{f}(t,\underline{\mathbf{x}},\overline{\mathbf{x}},\mathbf{u}) \le f(t,\mathbf{x},\mathbf{u},\zeta) \le \overline{f}(t,\underline{\mathbf{x}},\overline{\mathbf{x}},\mathbf{u})$ для некоторых заданных $\underline{f} : R^{2n+m+1} \to R^n$, $\overline{f} : R^{2n+m+1} \to R^n$ и всех $t \ge 0$, $\|\mathbf{u}\| \le \mathbf{U}$, $\zeta \in \Theta$.

Допущение 3. Существует матричная функция $\mathbf{L} : R^{p+m+1} \to R^{n\times p}$, $\mathbf{P} : R_+ \to R^{n\times m}$, $\mathbf{P}(\cdot) = \mathbf{P}(\cdot)^T > 0$ такая, что для всех $t \ge 0$ и $\|\mathbf{u}\| \le \mathbf{U}$, $\|\mathbf{y}\| \le \mathbf{Y}$

$$\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{D}(t,\mathbf{y},\mathbf{u})^T\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{D}(t,\mathbf{y},\mathbf{u}) + \mathbf{P}(t)^2 + \mathbf{Q} = 0;$$

$$\mathbf{D}(t,\mathbf{y},\mathbf{u}) = \mathbf{A}(t,\mathbf{y},\mathbf{u}) - \mathbf{L}(t,\mathbf{y},\mathbf{u})\mathbf{C}(t,\mathbf{u});$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0.$$

Допущение 2 означает, что если даны границы $\underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}$ состояния **x**, то значения нелинейной функции f заключены в интервале $\left[\underline{f}, \overline{f}\right]$ для всех $\zeta \in \Theta$. В допущении 3 представлен коэффициент усиления наблюдателя **L**(t, **y**, **u**), который обеспечивает устойчивость нестационарной матрицы **D**(t, **y**, **u**) с матрицей функции Ляпунова **P**(t), это допущение определяет условия устойчивости динамики оценки.

При этих допущениях, если существует матрица-усилитель $\mathbf{L} \in R^{n\times p}$ из допущения 3, такая, что матрица **D**(t, **y**, **u**)= **A–LC** является гурвицевой и мецлеровой, можно построить интервальный наблюдатель [4, 5] вида

$$\begin{aligned} \dot{\underline{\mathbf{x}}} &= \left(\mathbf{A} - \mathbf{LC}\right)\underline{\mathbf{x}} + \underline{f}(t,\mathbf{y},\mathbf{u}) + \mathbf{L}\mathbf{y}; \\ \dot{\overline{\mathbf{x}}} &= \left(\mathbf{A} - \mathbf{LC}\right)\overline{\mathbf{x}} + \overline{f}(t,\mathbf{y},\mathbf{u}) + \mathbf{L}\mathbf{y}. \end{aligned} \tag{2}$$

Теорема 1. [19, 20] Пусть выполнены допущения 1, 2 и 3 и матрица $\mathbf{D}(t, \mathbf{y}, \mathbf{u})$ мецлерова для всех $t \geq 0$ и $\|\mathbf{u}\| \leq \mathbf{U}$, $\|\mathbf{y}\| \leq \mathbf{Y}$. Пусть выполнено одно из следующих условий:

1. $\underline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) < +\infty$, $\overline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) < +\infty$ для любых $t \geq 0$, $\|\mathbf{u}\| \leq \mathbf{U}$ и всех $\underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}} \in R^n$;
2. для любых $t \geq 0$, $\|\mathbf{x}\| \leq \mathbf{X}$, $\|\mathbf{u}\| \leq \mathbf{U}$, $\zeta \in \Theta$ и всех $\underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}} \in R^n$

$$\left|f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta) - \underline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u})\right|^2 + \left|\overline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) - f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta)\right|^2 \leq \beta\|\underline{\mathbf{e}}\|^2 + \beta\|\overline{\mathbf{e}}\|^2 + \alpha$$

для некоторых $\alpha \in R_+$, $\beta \in R_+$ и $\beta\mathbf{I}_n - \mathbf{Q} + \mathbf{R} = 0$, $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T > 0$.

Тогда в (1) и (2) переменные $\underline{\mathbf{x}}(t), \overline{\mathbf{x}}(t)$ остаются ограниченными для всех $t > 0$, и

$$\underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x} \leq \overline{\mathbf{x}}$$

обеспечивает соотношение

$$\underline{\mathbf{x}}(0) \leq \mathbf{x}(0) \leq \overline{\mathbf{x}}(0).$$

Доказательство. Рассмотрим ошибки интервального оценивания $\overline{\mathbf{e}} = \overline{\mathbf{x}} - \mathbf{x}$, $\underline{\mathbf{e}} = \mathbf{x} - \underline{\mathbf{x}}$:

$$\dot{\underline{\mathbf{e}}} = \mathbf{D}(t, \mathbf{y}, \mathbf{u})\underline{\mathbf{e}} + f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta) - \underline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u});$$

$$\dot{\overline{\mathbf{e}}} = \mathbf{D}(t, \mathbf{y}, \mathbf{u})\overline{\mathbf{e}} + \overline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) - f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta).$$

Согласно допущению 2, для мецлеровой матрицы $\mathbf{D}$ для всех $t \geq 0$ свойства $f(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \zeta) \geq \underline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}(t), \overline{\mathbf{x}}(t), \mathbf{u}(t))$, $f(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \zeta) \leq \overline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u})$ и $\underline{\mathbf{x}}(t) \leq \mathbf{x}(t) \leq \overline{\mathbf{x}}(t)$ выполняются при условии, что $\underline{\mathbf{x}}(0) \leq \mathbf{x}(0) \leq \overline{\mathbf{x}}(0)$. Чтобы доказать, что переменные $\underline{\mathbf{x}}(t), \overline{\mathbf{x}}(t)$ ограничены, рассмотрим производную функции Ляпунова $\mathbf{V} = \underline{\mathbf{e}}^T\mathbf{P}(t)\underline{\mathbf{e}} + \overline{\mathbf{e}}^T\mathbf{P}(t)\overline{\mathbf{e}}$:

$$\dot{\mathbf{V}} = \underline{\mathbf{e}}^T\left[\dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{D}(t, \mathbf{y}, \mathbf{u})^T\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{D}(t, \mathbf{y}, \mathbf{u})\right]\underline{\mathbf{e}} +$$

$$+\overline{\mathbf{e}}^T\left[\dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{D}(t, \mathbf{y}, \mathbf{u})^T\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{D}(t, \mathbf{y}, \mathbf{u})\right]\overline{\mathbf{e}} + 2\underline{\mathbf{e}}^T\mathbf{P}(t)\left[f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta) - \underline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u})\right] +$$

$$+2\overline{\mathbf{e}}^T\left[\overline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) - f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta)\right].$$

Согласно допущению 3, это уравнение может быть переписано следующим образом:

$$\dot{\mathbf{V}} \leq -\overline{\mathbf{e}}^T\mathbf{Q}\overline{\mathbf{e}} - \underline{\mathbf{e}}^T\mathbf{Q}\underline{\mathbf{e}} + \left|f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta) - \underline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u})\right|^2 + \left|\overline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) - f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta)\right|^2$$

Если первое условие теоремы верно, тогда элементы $\left|f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta) - \underline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u})\right|$ и $\left|\overline{f}(t, \underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) - f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \zeta)\right|$ ограничены для любых $t \geq 0$, $\|\mathbf{x}\| \leq \mathbf{X}$, $\|\mathbf{u}\| \leq \mathbf{U}$, $\zeta \in \Theta$ и всех $\underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}} \in R^n$. Таким образом, ошибки $\overline{\mathbf{e}}, \underline{\mathbf{e}}$ ограничены стандартными аргументами Ляпунова, и поэтому переменные $\underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}$ также ограничены (из допущения 1 состояние $\mathbf{x}$ ограничено). Если второе условие теоремы выполняется, то это неравенство принимает вид

$$\dot{\mathbf{V}} \leq -\overline{\mathbf{e}}^T\mathbf{Q}\overline{\mathbf{e}} - \underline{\mathbf{e}}^T\mathbf{Q}\underline{\mathbf{e}} + \alpha,$$

что подразумевает ограниченность $\underline{\mathbf{x}}, \overline{\mathbf{x}}$ теми же аргументами.

Результат теоремы 1 основан на довольно строгом допущении, что матрица $\mathbf{D}$ – мецлерова. Все остальные предположения довольно часто встречаются в теории оценивания.

Пример

Рассмотрим модель регуляции гормона тестостерона [2–4]:

$$\begin{cases} \dot{R}(t) = f(T) - b_1R(t) + d(t); \\ \dot{L}(t) = g_1R(t) - b_2L(t); \qquad f(t) = \dfrac{A}{K + \left(T(t)\right)^u}; \\ \dot{T}(t) = g_2L(t) - b_3T(t); \\ y(t) = T(t), \end{cases}$$

где $R \in R_+$ – концентрация лютеинизирующего (гонадотропин) релизинг-гормона; $L \in R_+$ – концентрация лютеинизирующего гормона; $T \in R_+$ – концентрация гормона тестостерона.

Известны параметры системы: $b_1=3$, $b_2=1$, $b_3=1$ – скорости освобождения гормонов, $g_1=10$, $g_2=50$ – скорости секреции гормонов. Неопределенность системы: $8 = \underline{A} \leq A \leq \overline{A} = 12$, $1,5 = \underline{\mu} \leq \mu \leq \overline{\mu} = 2,5$, $1,5 = \underline{K} \leq K \leq \overline{K} = 2,5$. Для моделирования объекта управления мы используем средние значения: $A=10$, $\mu=2$, $K=2$.

Входное воздействие $d(t) \in R_+$ представляет собой пульсирующий механизм: $d(t) = d_0(t) \cdot \delta d(t)$, где d_0 известно, а $1-\delta \le \delta d \le 1-\delta$ – неизвестная модуляция. Для моделирования системы было взято:

$$d_0(t) = \left(1+\sin\left(0,1t\right)\right)e^{-\left(5+5\sin\left(0,6t\right)\right)^2}, \quad \delta d(t) = 1-\delta\cos(2t), \quad \delta = 0,25..$$

В заданной системе вектор состояний $\mathbf{x}(t)$ состоит из трех переменных $\mathbf{x}(t) = \left[R(t) \quad L(t) \quad T(t)\right]^T$. Тогда объект управления принимает следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -b_1 & 0 & 0 \\ g_1 & -b_2 & 0 \\ 0 & g_2 & -b_3 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\left[f(t) + d(t)\right]; \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}. \end{cases}$$

На рис. 1–3 приведены графики моделирования построенной системы интервального наблюдения для системы регуляции гормона. На рис. 1 показано изменение концентрации гонадотропин-релизинг-гормона $R(t)$ (кривая 1) и его верхняя (кривая 2) и нижняя (кривая 3) оценка. По такому же принципу на рис. 2, 3 изображены результаты моделирования для изменения концентрации лютеинизирующего гормона $L(t)$ и концентрации гормона тестостерона $T(t)$ соответственно.

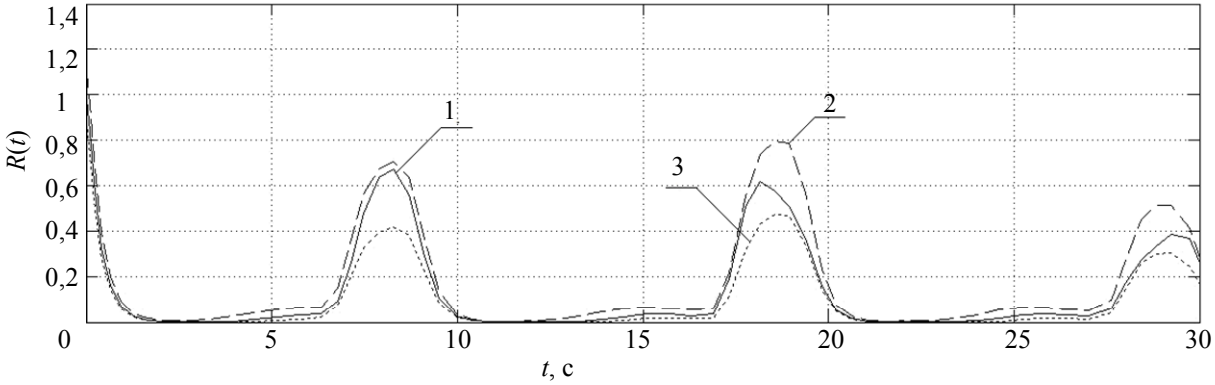


Рис. 1. Результаты моделирования: изменение состояния концентрации гормона $R(t)$ (1) и его интервальная оценка (2, 3)

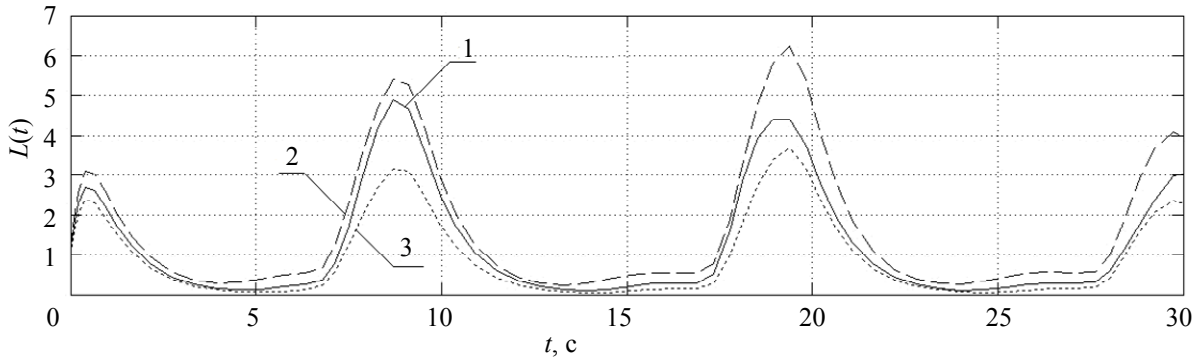


Рис. 2. Результаты моделирования: изменение состояния концентрации гормона $L(t)$ (1) и его интервальная оценка (2, 3)

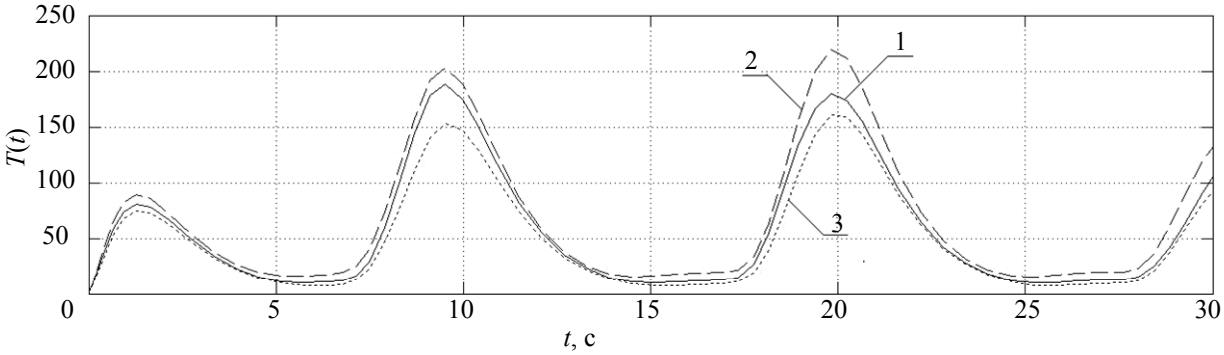


Рис. 3. Результаты моделирования: изменение состояния концентрации гормона тестостерона $T(t)$ (1) и его интервальная оценка (2, 3)

Заключение

Проиллюстрировано, что интервальный наблюдатель позволяет получить область оценок переменных состояния системы, гарантированно содержащих фактическое значение состояния в данный момент времени. Показаны условия построения подобного устройства оценки для рассматриваемого класса систем. Приведено доказательство теоремы об ограниченности траекторий полученной области на основе свойств кооперативности системы. Подход проверен на основе компьютерного моделирования системы регуляции гормона.

Литература

1. Murray J.D. Mathematical Biology, I: An introduction.–3rd ed. – New York: Springer, 2002. – 551 p.
2. Farhy L.S. Modeling of oscillations of endocrine networks with feedback // Methods in Enzymology. – 2004. – V. 384. – P. 54–81.
3. Медведев А.В., Чурилов А.Н., Шепелявый А.И. Математические модели регуляции тестостерона // Стохастическая оптимизация в информатике. – Изд-во СПбГУ, 2006. – № 2. – С. 147–158.
4. Enciso G., Sontag E.D. On the stability of a model of testosterone dynamics // J. Math. Biol. – 2004. – V. 49. – P. 627–634.
5. Smith R.W. Hypothalamic regulation of pituitary secretion of luteinizing hormone - II. Feedback control or gonadotropin secretion // Bull. Math. Biol. – 1980. – V. 42. – № 1. – P. 57–78.
6. Jaulin. L. Nonlinear bounded-error state estimation of continuous time systems // Automatica. – 2002. – V. 38. – № 2. – P. 1079–1082.
7. Kiefer M., Walter E. Guaranteed nonlinear state estimator for cooperative systems // Numerical Algorithms. – 2004. – V. 37. – P. 187–198.
8. Olivier B., Gouze J.L. Closed loop observers bundle for uncertain biotechnological models // Journal of Process Control. – 2004. – V. 14. – № 7. – P. 765–774.
9. Moisan M., Bernard O., Gouze J.L. Near optimal interval observers bundle for uncertain bio-reactors // Automatica. – 2009. – V. 45. – № 1. – P. 291–295.
10. Raissi T., Videau G., Zolghadri A. Interval observers design for consistency checks of nonlinear continuous-time systems // Automatica. – 2010. – V. 46. – № 3. – P. 518–527.
11. Raissi T., Efimov D., Zolghadri A. Interval state estimation for a class of nonlinear systems // IEEE Trans. Automatic Control. – 2012. – V. 57. – № 1. – P. 260–265.
12. Efimov D., Fridman L.M., Raissi T., Zolghadri A., R. Seydou. Interval estimation for LPV systems applying high order sliding mode techniques // Automatica. – 2012. – V. 48. – P. 2365–2371.
13. Mazenc F., Bernard O. Interval observers for linear time-invariant systems with disturbances // Automatica. – 2011. – V. 47. – № 1. – P. 140–147.
14. Чеботарев С.Г., Кремлев А.С. Синтез интервального наблюдателя для линейной системы с переменными параметрами // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – № 4. – С. 42–47.
15. Chebotarev S., Efimov D., Raïssi T., Zolghadri A. On Interval Observer Design for a Class of Continuous-Time LPV Systems // Proc. IFAC NOLCOS 2013. – Toulouse, 2013. – P. 68–73.
16. Chebotarev S., Kremlev A. Analysis conditions on interval observer synthesis for linear systems with variable parameters // 18th International Conference on Methods and Models in Automation & Robotics. – MMAR 2013. – Międzyzdroje, 2013. – P. 390–392.
17. Чеботарев С.Г., Кремлев А.С. Анализ линейных систем с переменными параметрами для синтеза интервальных наблюдателей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 6 (82). – С. 50–53.
18. Smith H.L. Surveys and monographs: Monotone dynamical systems: an introduction to the theory of competitive and cooperative systems. – Providence: AMS, 1995. – V. 41. – 174 p.
19. Efimov Denis, Raïssi Tarek, Chebotarev Stanislav, Zolghadri Ali. Interval state observer for nonlinear time varying systems // Automatica. – 2013. – V. 49. – № 1. – P. 200–205.
20. Efimov Denis V., Raïssi Tarek, Chebotarev Stanislav, Zolghadri Ali. On set-membership observer design for a class of periodical time-varying systems // Decision and Control (CDC). – 2012. – P. 6767–6772.

Ефимов Денис Валентинович – France, Villeneuve d'Ascq, Национальный институт исследований по информатике и автоматике, доктор технических наук, ответственный исследователь первого ранга, Denis.Efimov@inria.fr

Кремлев Артем Сергеевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, kremlev_artem@mail.ru

Харьковская Татьяна Александровна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, магистрант, easymedia@mail.ru

Чеботарев Станислав Геннадьевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, freest5@gmail.com

УДК 53.082.54

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Г.П. Мирошниченко, И.Г. Дейнека, Д.А. Погорелая, Ф.А. Шуклин, М.А.Смоловик

Предложен способ измерения фазы интерферометрического сигнала, который может быть применен для обработки сигнала волоконно-оптических фазовых датчиков. Разработанный метод позволяет скомпенсировать температурный дрейф частоты интерферометрического сигнала путем генерации трехтактной формы модулирующего пилообразного сигнала. Предложен линейный метод наименьших квадратов, имеющий однозначное решение. Приводятся результаты численного эксперимента, подтверждающие точность разработанного метода измерения фазовых сдвигов, и даются численные оценки температурного дрейфа фазы, задаваемой модулятором, и уровня стабильности температуры, обеспечивающие величину измеряемой фазы на уровне 10^{-8} рад.

Ключевые слова: фаза интерферометрического сигнала, пилообразная модуляция, температурный дрейф частоты.

Введение

Наиболее высокочувствительные системы измерений могут быть созданы на основе волоконно-оптических фазовых датчиков интерферометрического типа [1]. В настоящей работе рассмотрен способ измерения фазы интерферометрического сигнала (несущей информацию об измеряемой величине – скорости вращения, амплитуде напряжения и др.), который может быть осуществлен, например, с помощью дистанционного двухплечевого интерферометрического измерителя с поляризационным разделением каналов в плечах [2] и вспомогательной пилообразной фазовой модуляцией. Близкие по принципу действия измерительные схемы анализировались в [3, 4]. Однако в этих работах не предусмотрена компенсация дрейфа частоты выходного интерферометрического сигнала, вызванного температурной зависимостью полуволнового напряжения модулятора. Например, в модуляторе на кристалле $LiNbO_3$ [5] при увеличении температуры на 1°С полуволновое напряжение уменьшается на 0,003 В. В результате при изменении температуры значение разности фаз между интерферирующими волнами, задаваемое модулирующим пилообразным сигналом, меняется относительно ожидаемого, что приводит к неправильной трактовке расположения точек выходного интерферометрического сигнала цифровым устройством обработки. Следовательно, необходимо учитывать дополнительную частотную составляющую выходного интерферометрического сигнала, обусловленную температурным дрейфом полуволнового напряжения модулятора. Цель данной работы – разработать способ измерения фазы интерферометрического сигнала, компенсирующий температурный дрейф.

Традиционный метод для измерения фазы интерферометрического сигнала

Для дистанционных измерений физических величин используются оптические интерференционные методы. Здесь измеряемая величина создает дополнительный сдвиг фазы Δ в одном плече интерферометра, от которого зависит интенсивность интерферирующих на фотодетекторе световых полей (интерферометрический сигнал). Интенсивность интерферометрического сигнала описывается формулой

$$Y(t) = A(t) + V(t)\cos(\Delta) \ .$$

Здесь $A(t), V(t)$ – случайные процессы («подставка» и «видность») интерференционной картины. Фаза Δ функционально зависит от физической величины. В известных методах измерения фазы используется дополнительная модуляция фазы интерферометрического сигнала пилообразным сигналом [6] с помощью фазового модулятора, форма напряжения на котором приведена на рис. 1.

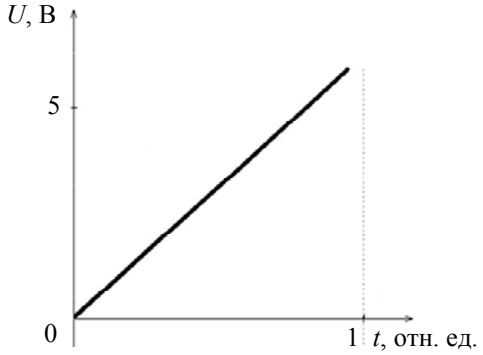


Рис. 1. Зависимость амплитуды модулирующего пилообразного сигнала *U* от времени *t*, где период пилообразного сигнала полагается равным единице

В результате такой модуляции выходной интерферометрический сигнал приобретает форму

$$Y(t) = A(t) + V(t)\cos\left((2\pi + \Delta\omega)t + \Delta\right) \ , \qquad (1)$$

а период модулирующего пилообразного сигнала задает период выходного интерферометрического сигнала. На рис. 2 показаны модулирующий (рис. 2, а) и выходной интерферометрический (рис. 2, б) сигналы. В формуле (1) $\Delta\omega$ – случайный температурный дрейф частоты пилообразного сигнала. Измеряемая информация содержится в измеряемой фазе Δ, которая может медленно (по сравнению с изменением пилообразного напряжения) изменяться во времени. Цель экспериментатора – по возможности точно и в реальном времени отслеживать график изменения фазы Δ. Фаза Δ извлекается из случайного сигнала (1) с помощью методов математической статистики. В традиционном методе наименьших квадратов (МНК) для построения линии регрессии используют базис из трех функций $\{1, \cos(2\pi t), \sin(2\pi t)\}$. В этих формулах полагаем период пилообразного сигнала равным единице. Время t меняется дискретно в течение одного периода по закону

$$t_n = \frac{1}{M} n, \; n = 0, 1 ... M - 1. \qquad (2)$$

Здесь M – число временных узлов. Линия регрессии имеет вид

$$y(t) = a + v\cos(2\pi t + \Delta) = a + v\cos(\Delta)\cos(2\pi t) - v\sin(\Delta)\sin(2\pi t) = a + C\cos(2\pi t) - S\sin(2\pi t).$$

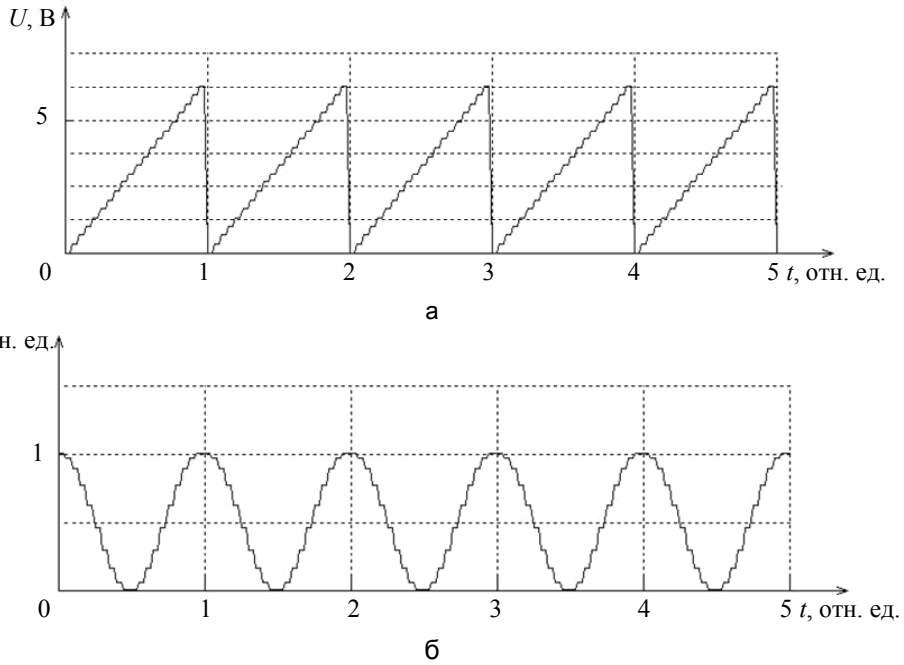


Рис. 2. Временное соотношение пилообразного модулирующего сигнала *U* (а) и выходного интерферометрического сигнала *Y* (б)

Здесь три параметра $\{a, C, S\}$ линейно входят в формулу регрессии и подлежат определению. Согласно МНК, поиск оптимальных значений этих параметров сводится к решению системы трех линейных уравнений

$$\begin{pmatrix} 1 & \overline{\cos(2\pi t)} & \overline{-\sin(2\pi t)} \\ \overline{\cos(2\pi t)} & \overline{(\cos(2\pi t))^2} & \overline{-\cos(2\pi t)\sin(2\pi t)} \\ \overline{\sin(2\pi t)} & \overline{\cos(2\pi t)\sin(2\pi t)} & \overline{-(\sin(2\pi t))^2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ C \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{Y(t)} \\ \overline{Y(t)\cos(2\pi t)} \\ \overline{Y(t)\sin(2\pi t)} \end{pmatrix}.$$

Здесь черта сверху $\overline{W}$ означает усреднение величины W по измерительным моментам t_n (2) периода пилообразного сигнала. Точность метода определяется соотношением $\frac{\Delta\omega}{2\pi}$, а измеряемая фаза Δ – формулой $\Delta = \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{S}{C}\right)$.

Сущность метода компенсации температурного дрейфа частоты пилообразного сигнала

Существуют измерения, где точность традиционного метода недостаточна. Для повышения точности используют сложные электронные схемы с обратной связью [6], служащей для компенсации темпе-

ратурных дрейфов частоты «пилы». В нашей работе показано, что для восстановления фазы интерферометрического сигнала с повышенной точностью не обязательно использовать схемы с обратной связью, но достаточно решить задачу оптимизации. Эта нелинейная задача содержит четыре подгоночных параметра, и при большом диапазоне изменения фазы задача может иметь неоднозначные решения в силу нелинейности. Необходим по возможности линейный МНК, имеющий однозначное решение. Суть предлагаемого метода состоит в следующем. Создадим линейно изменяющийся во времени дополнительный сдвиг фазы с помощью пилообразного напряжения на модуляторе, период которого складывается из трех следующих друг за другом тактов $U_1(t), U_2(t), U_3(t)$:

$$U_1(t) = \frac{U_\pi}{\pi}(2\pi + \Delta\omega)t,$$

$$U_2(t) = \frac{U_\pi}{\pi}(2\pi + \Delta\omega)\left(t - \frac{1}{2}\right),$$

$$U_3(t) = \frac{U_\pi}{\pi}(2\pi + \Delta\omega)\left(t - \frac{1}{4}\right).$$

где U_π – паспортное значение полуволнового напряжения модулятора, длительность каждого такта пилообразного сигнала полагаем равным единице, т.е. $0 \le t \le 1$. На рис. 3 показаны три такта, составляющие период модулирующего пилообразного сигнала.

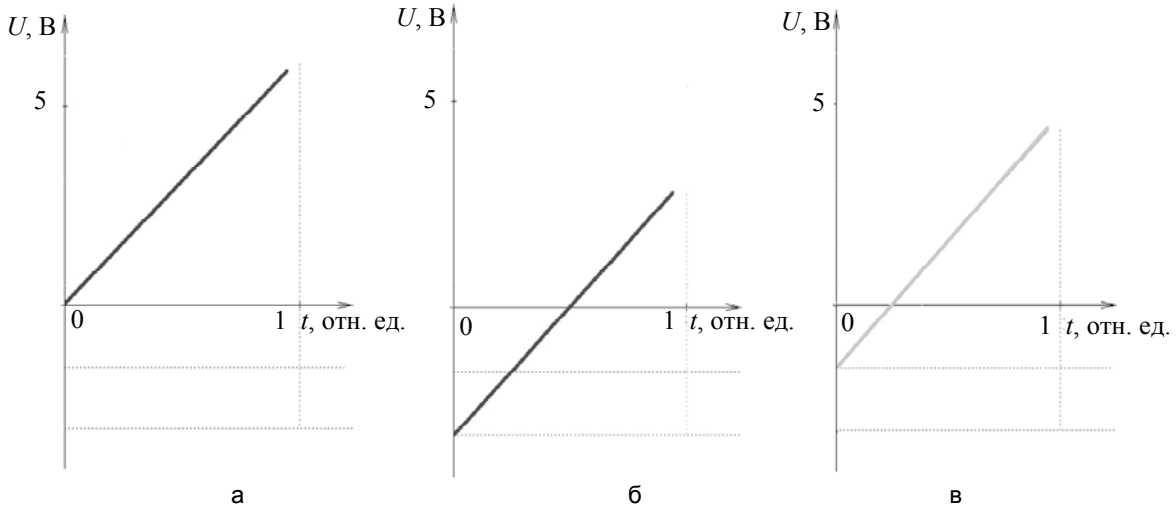


Рис. 3. Зависимость амплитуды модулирующего трехтактного пилообразного сигнала *U* от времени *t*: первый такт (а); второй такт (б); третий такт (в)

Соответствующий закон изменения измерительной фазы $\varphi_3(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_1(t)$ трех следующих друг за другом тактов пилообразного сигнала запишем в виде следующей системы:

$$\varphi_1(t) = (2\pi + \Delta\omega)t,$$

$$\varphi_2(t) = (2\pi + \Delta\omega)\left(t - \frac{1}{2}\right),$$

$$\varphi_3(t) = (2\pi + \Delta\omega)\left(t - \frac{1}{4}\right).$$

В реальном эксперименте интенсивности сигналов интерференции $Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t)$ на каждом такте измерения – случайные временные процессы, которые описываются формулами, аналогичными формуле (1):

$$Y_1(t) = A_1(t) + V_1(t)\cos\left((2\pi + \Delta\omega)t + \Delta\right),$$

$$Y_2(t) = A_2(t) + V_2(t)\cos\left((2\pi + \Delta\omega)\left(t - \frac{1}{2}\right) + \Delta\right),$$

$$Y_3(t) = A_3(t) + V_3(t)\cos\left((2\pi + \Delta\omega)\left(t - \frac{1}{4}\right) + \Delta\right).$$

Здесь Δ – информационная фаза, которую следует определить из сигнала интерференции; $A_1(t)$, $A_2(t)$, $A_3(t)$ – случайные функции времени – «подставки»; $V_1(t)$, $V_2(t)$, $V_3(t)$ – случайные функции времени – «видность» картины; $\Delta\omega$ – случайный (но постоянный на интервале трех тактов пилообразного сигнала) скачок частоты из-за температурного дрейфа. Фаза Δ считается постоянной на трех тактах пилообразного сигнала. Необходимо разработать МНК, позволяющий найти оптимальное значение фазы Δ по снятым в эксперименте значениям случайных величин $Y_1(t)$, $Y_2(t)$, $Y_3(t)$. Обозначим дискретные моменты времени

$$t_n = \frac{1}{M}n,\ n = 0,1...M-1,$$

и соответствующие им три вектора случайных величин

$$Y_{1,n} = Y_1(t_n),$$
$$Y_{2,n} = Y_2(t_n),$$
$$Y_{3,n} = Y_3(t_n).$$

Получаем систему связанных величин

$$\begin{Bmatrix} t_0,\quad t_1.....t_{M-1} \\ Y_{1,0}, Y_{1,1},...Y_{1,M} \\ Y_{2,0}, Y_{2,1},...Y_{2,M} \\ Y_{3,0}, Y_{3,1},...Y_{3,M} \end{Bmatrix}.$$

По этой системе следует найти оптимальную величину – фазу Δ. Согласно МНК, предлагается уравнение регрессии в виде

$$\begin{aligned} y_1(t) &= a + v\cos\left((2\pi+\Delta\omega)t+\Delta\right), \\ y_2(t) &= a + v\cos\left((2\pi+\Delta\omega)\left(t-\frac{1}{2}\right)+\Delta\right), \\ y_3(t) &= a + v\cos\left((2\pi+\Delta\omega)\left(t-\frac{1}{4}\right)+\Delta\right). \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь следует найти оптимальный набор параметров $a, v, \Delta\omega, \Delta$. Составляем уравнение оптимизации в виде

$$\sum_{n=0}^{M-1}\left|y_1(t_n)-Y_{1,n}\right|^2 = S_1(a,v,\Delta\omega,\Delta) \to \min,$$
$$\sum_{n=0}^{M-1}\left|y_2(t_n)-Y_{2,n}\right|^2 = S_2(a,v,\Delta\omega,\Delta) \to \min,$$
$$\sum_{n=0}^{M-1}\left|y_3(t_n)-Y_{3,n}\right|^2 = S_3(a,v,\Delta\omega,\Delta) \to \min.$$

Параметр a можно определить из второго и третьего уравнений во втором порядке по скачку частоты пилы $\Delta\omega$. Для этого выполним дифференцирование:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_1(a,v,\Delta\omega,\Delta)}{\partial a} &= \sum_{n=0}^{M-1}\left(a + v\cdot\cos\left((2\pi+\Delta\omega)t_n+\Delta\right) - Y_{1,n}\right) = 0, \\ \frac{\partial S_2(a,v,\Delta\omega,\Delta)}{\partial a} &= \sum_{n=0}^{M-1}\left(a + v\cdot\cos\left((2\pi+\Delta\omega)\left(t_n-\frac{1}{2}\right)+\Delta\right) - Y_{2,n}\right) = 0. \end{aligned} \tag{4}$$

Оценим суммы с помощью интегралов:

$$\sum_{n=0}^{M-1}\cos\left((2\pi+\Delta\omega)t_n+\Delta\right) \approx M\int_0^1\cos\left((2\pi+\Delta\omega)t+\Delta\right)dt = 2M\frac{\cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}+\Delta\right)\sin\left(\frac{\Delta\omega}{2}\right)}{2\pi+\Delta\omega}, \tag{5}$$

$$\sum_{n=0}^{M-1}\cos\left((2\pi+\Delta\omega)\left(t_n-\frac{1}{2}\right)+\Delta\right) \approx M\int_0^1\cos\left((2\pi+\Delta\omega)\left(t-\frac{1}{2}\right)+\Delta\right)dt = -2M\frac{\cos(\Delta)\sin\left(\frac{\Delta\omega}{2}\right)}{2\pi+\Delta\omega}. \tag{6}$$

Сложив формулы (4) и используя свойства (5), (6), получаем с точностью до $\frac{1}{4}\left(\frac{\Delta\omega}{2\pi}\right)^2$ оптимальное значение параметра a

$$a = \sum_{n=0}^{M-1} \frac{\left(Y_{1,n} + Y_{2,n}\right)}{2M}.$$

Вычтем из экспериментальных случайных величин их средние,

$$Z_{1,n} = Y_{1,n} - a,$$

$$Z_{2,n} = Y_{2,n} - a,$$

$$Z_{3,n} = Y_{3,n} - a,$$

и введем случайную величину

$$U_n = \frac{\operatorname{arc\,tg}\left(\frac{Z_{3,n}}{Z_{1,n}}\right) - \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{Z_{3,n}}{Z_{2,n}}\right)}{2}. \qquad (7)$$

Анализируя формулы (3), (7), делаем вывод, что с точностью, квадратичной по $\Delta\omega$, для U_n можно написать уравнение линейной регрессии с двумя определяемыми параметрами $\Delta\omega$, Δ:

$$u(t) = (2\pi + \Delta\omega)\left(t - \frac{1}{4}\right) + \Delta + \frac{\pi}{2}.$$

С помощью линейной регрессии получаем оптимальное значение измеряемой фазы:

$$\Delta = \frac{\left(7M^2 - 12M + 8\right)\bar{U} - 12M\left(M-2\right)\overline{U\left(t - \frac{1}{4}\right)}}{4\left(M^2 - 1\right)} - \frac{\pi}{2}.$$

Здесь обозначены средние величины:

$$\bar{U} = \frac{1}{M}\sum_{n=0}^{M-1} U_n, \quad \overline{U\left(t - \frac{1}{4}\right)} = \frac{1}{M}\sum_{n=0}^{M-1} U_n \cdot \left(t_n - \frac{1}{4}\right).$$

В формуле (7) использован $\operatorname{arc\,tg}(\alpha)$, главное значение которого определено в области $-\frac{\pi}{2} \le \alpha \le \frac{\pi}{2}$. При переходе в соседнюю зону функция $\operatorname{arc\,tg}(\alpha)$ испытывает скачок. В программе обработки выходного сигнала следует предусмотреть средство, устраняющее этот скачок. Точность метода определяется отброшенными при определении параметра a слагаемыми, имеющими порядок $\frac{1}{4}\left(\frac{\Delta\omega}{2\pi}\right)^2$, и разбросом случайных величин $Y_{1,n}, Y_{2,n}, Y_{3,n}$. Таким образом, можно сделать вывод, что точность традиционного метода линейна по скачку частоты интерференционного сигнала $\Delta\omega$, а точность предложенного метода квадратична по $\Delta\omega$.

Результаты численного эксперимента

Традиционный и предложенный МНК были сопоставлены в численном эксперименте. Пусть каждое новое значение фазы имеет свой порядковый номер измерения. Считается, что за период пилообразного сигнала фаза не изменяется. Пусть измеряемая фаза Δ изменяется так, как показано на рис. 4.

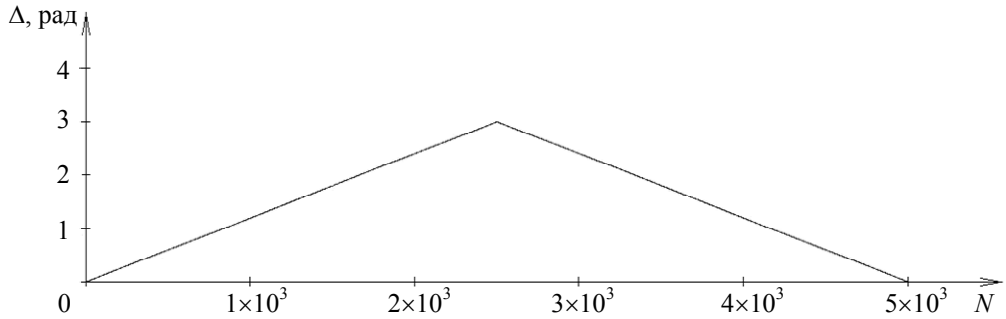


Рис. 4. Зависимость фазы интерферометрического сигнала Δ от порядкового номера измерения N

Дополнительная частота $\Delta\omega$, возникающая при температурном дрейфе, считается случайной величиной, изменяющейся при каждом измерении со средним квадратичным отклонением 0,001 рад. При этом «подставка» и «видность» интерференционной картины задавались с разбросом порядка 10^{-8}. В этом случае погрешность восстановления фазы определяется точностью задания частоты пилообразного сигнала. В традиционном способе по формуле $\frac{\Delta\omega}{2\pi}$ абсолютная погрешность имеет порядок 10^{-4} рад, а в предложенном в работе способе по формуле $\frac{1}{4}\left(\frac{\Delta\omega}{2\pi}\right)^2$ абсолютная погрешность имеет порядок 10^{-8} рад. В численном эксперименте с помощью обоих МНК была восстановлена фаза Δ' с погрешностью $\delta = \Delta - \Delta'$. На рис. 5 приведены графики абсолютной погрешности $\delta = \Delta - \Delta'$ в зависимости от порядкового номера измерения для традиционного и предложенного способов соответственно.

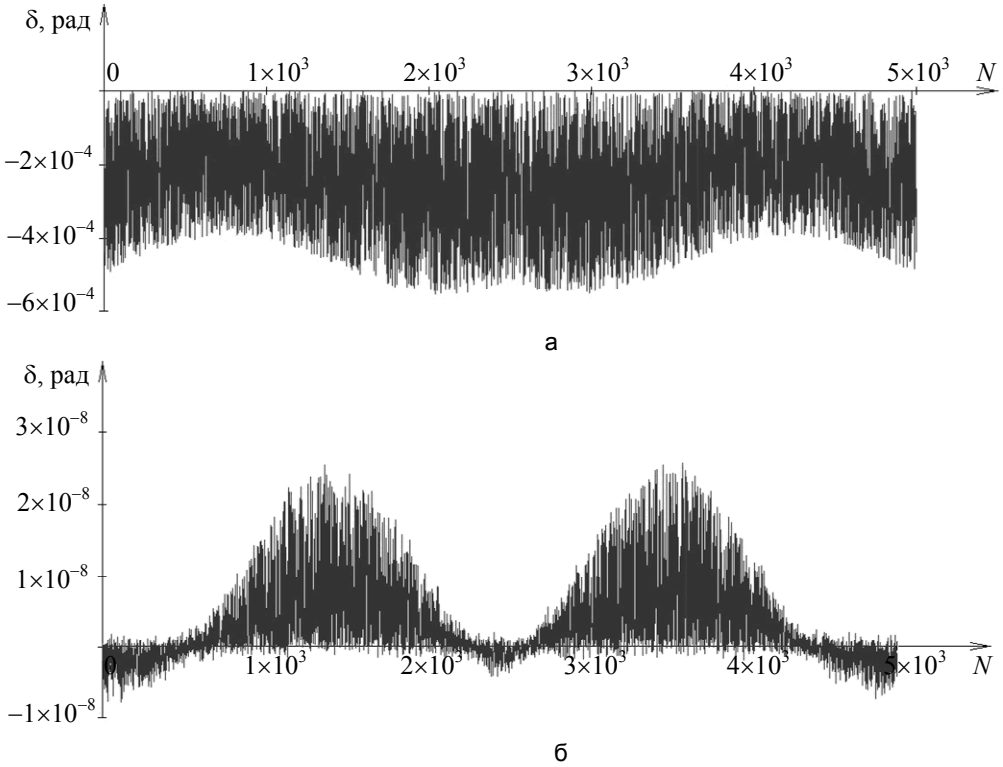


Рис. 5. Зависимость абсолютной погрешности δ от порядкового номера измерения *N* для традиционного способа (а); предложенного способа (б)

Из зависимостей на рис. 5 видно, что предложенный способ обеспечивает абсолютную погрешность порядка 10^{-8} рад, что меньше погрешности традиционного способа.

Заключение

В работе предложен способ измерения фазы интерферометрического сигнала, который может быть применен для обработки сигнала волоконно-оптических фазовых датчиков. Решена проблема температурного дрейфа частоты интерферометрического сигнала, обусловленного температурной зависимостью полуволнового напряжения модулятора. Компенсация температурного дрейфа частоты интерферометрического сигнала осуществляется путем генерации трехтактной формы модулирующего пилообразного сигнала. Предположим, что температурный дрейф фазы, задаваемой фазовым модулятором, составляет 10^{-3} рад/К. Допустим, уход температуры со временем не превышает 1 К/ч. Тогда можно ожидать, что в течение часа температурный уход фазы модулятора не превысит 10^{-3} рад. В этом случае предложенный в работе метод обеспечит точность измерения фазы Δ на уровне 10^{-8} рад (при условии, что «подставка» и «видность» интерференционной картины имеют разброс, не превышающий 10^{-8}). В результате разработан линейный метод наименьших квадратов, позволяющий восстанавливать малые значения фаз, имеющий погрешность, квадратичную по скачку частоты интерференционного сигнала.

Работа выполнена в НИУ ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

Литература

1. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.
2. Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М. Дистанционный интерферометрический датчик с поляризационным разделением каналов // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – № 10. – С. 28–34.
3. Патент EP2426880 A2 США, H04L27/22, 7.03.2012. Demodulation method / Kai Gossner; KROHNE Messtechnik GmbH. – EP20110006952; Заяв. 25 авг. 2011.
4. Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М. // Материалы V Международной НТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 1999. – Т. 3. – С. 1356–1366.
5. Мешковский И.К., Стригалев В.Е., Серебрякова В.С. Оптимизация параметров изготовления интегрально-оптических элементов для волоконно-оптических гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 4 (49). – С. 42–53.
6. Мешковский И.К., Стригалев В.Е., Тараканов С.А. Закрытая схема обработки сигнала в волоконно-оптическом датчике тока // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 1 (65). – С. 10–15.

Мирошниченко Георгий Петрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, gpmirosh@gmail.com

Дейнека Иван Геннадьевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vanodnk@gmail.com

Погорелая Дарья Андреевна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, pdaria@mail.ru

Шуклин Филипп Александрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, инженер-исследователь, shuklin.philipp@gmail.com

Смоловик Михаил Андреевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, инженер-исследователь, ma.smolovik@gmail.com

УДК 520.224.2. 224.4

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

Ю.В Баёва, Е.В. Лаповок, С.И. Ханков

Несмотря на большое количество публикаций, в настоящее время отсутствуют аналитические методики расчета, позволяющие определить изменение температуры космического объекта при его движении по вытянутой эллиптической орбите. Авторами разработана методика расчета нестационарных температур сферического оболочечного космического объекта при его движении по эллиптической орбите. Она включает определение зависимости высоты объекта над Землей от времени на основе решения уравнения движения по эллиптической орбите. По высоте орбиты в каждый момент времени вычисляются коэффициенты облученности, которые используются для определения величин падающих на аппарат удельных тепловых потоков от Земли и отраженного Землей солнечного излучения. Далее проводится расчет нестационарного теплового баланса с учетом прямой солнечной подсветки и среднеповерхностных температур. В качестве примера приведены результаты расчета нестационарного теплового режима космического объекта сферической формы для конкретных параметров орбиты в зависимости от его полной теплоемкости, определяемой толщиной стенки аппарата. Предложенная математическая модель проста и удобна для расчетов. Предложенный алгоритм расчета может быть распространен на другие выпуклые формы конструкции.

Ключевые слова: космический объект, эллиптическая орбита, удельный тепловой поток, нестационарная температура, нестационарный тепловой баланс.

Введение

В настоящее время возрастает актуальность разработки методов расчета тепловых режимов космических объектов (КО), движущихся по заданным орбитам (круговым и эллиптическим) в околоземном космическом пространстве (ОКП). Такие задачи обычно решаются с использованием сложных численных программ расчета. При этом расчеты разделяются на независимые этапы, включающие решение баллистической задачи [1–3], определение величины падающих на КО в ОКП лучистых тепловых потоков [4, 5], а также расчеты теплового режима КО [5]. Баллистическая часть задачи наиболее полно проработана [1–3]. Анализ конкретных практических задач показывает, что при движении КО по типовым орбитам реализуется его нестационарный тепловой режим, требующий применения численных методов

расчета, результаты которого обычно представляются в громоздком виде и трудны для интерпретации и определения основных закономерностей и обобщения выводов. При этом результаты расчетов всегда носят частный характер. Особое место занимают зарубежные статьи, содержащие результаты численных расчетов тепловых режимов конкретных конструкций телескопов космического базирования [6, 7].

При разработке методов обеспечения теплового режима космических аппаратов и бортовых приборов необходима информация о тепловом состоянии КО в каждой точке орбиты в самом обобщенном виде с учетом термоинерционных свойств КО. В связи с этим велика потребность в получении простых и доступных методик и алгоритмов расчетов, обеспечивающих наглядность описания без потери точности, хотя бы для наиболее простых выпуклых конфигураций КО. Для круговых орбит такая задача была решена авторами [8, 9], а решение для типовых случаев доведено до аналитических формул.

Целью настоящей работы являлась разработка методики расчетов нестационарных температур КО простейшей сферической формы, движущегося по вытянутой эллиптической орбите, при этом рассмотрена представляющая наибольший практический интерес оболочечная конструкция КО. Для достижения поставленной цели решались задачи расчета изменения во времени высоты КО над поверхностью Земли в зависимости от времени, определения полного нестационарного теплового баланса КО и его нестационарной температуры.

Задача решалась в рамках допущений об изотермичности поверхности Земли и ламбертовских законов отражения, а также об изотермичности КО. Эти ограничения соответствуют принципу поэтапного моделирования [10]. В результате могут быть получены эталонные решения, относительно которых можно на последующих этапах учитывать степень неизотермичности КО для частных случаев.

Методика расчетов

Методика расчетов, предложенная авторами, содержит последовательное решение трех задач, объединенных в общий алгоритм.

На первом этапе определяются координаты объекта в каждый момент времени и вычисляются расстояния от Земли до КО. На втором этапе составляется уравнение теплового баланса КО, рассчитываются коэффициенты облученности Землей и отраженным Землей солнечным излучением в функции высоты над поверхностью Земли. На основании вычисленных коэффициентов облученности определяются падающие на КО тепловые потоки. На третьем этапе из уравнения теплового баланса рассчитываются нестационарные температуры КО.

На основании закона Кеплера с дополнениями Ньютона можно определить зависимость во времени τ изменения угловой координаты радиус-вектора θ, а также расстояния от центра Земли до объекта r, движущегося по эллиптической траектории. Соответствующее уравнение может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = DA\left(1+e\cos\theta\right)^2; \quad D=\sqrt{GM}; \quad A=\left[a\left(1-e^2\right)\right]^{-1,5}, \tag{1}$$

где e – эксцентриситет орбиты; $M = 6\cdot10^{24}$ кг – гравитирующая масса Земли; $G = 6{,}67\cdot10^{-11}$ Н·м^2/ кг^2 – гравитационная постоянная; a – большая полуось эллипса.

Текущее расстояние от центра гравитирующей массы до КО равно

$$r=\frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\theta}. \tag{2}$$

Входящие в формулу (1) величины большой полуоси и эксцентриситета эллипса могут быть выражены через расстояния от центра Земли до КО в точках апогея r_a и перигея r_p:

$$a=\frac{r_a+r_p}{2}; \quad e=\frac{r_a-r_p}{2a}. \tag{3}$$

Значения r_a и r_p связаны с высотой орбиты соотношениями

$r_a = h_a + R$; $\quad r_p = h_p + R$,

где h_a и h_p – соответственно высота КО над поверхностью Земли в апогее и перигее; $R = 6371$ км – средний радиус Земли.

Энергетический баланс КО выпуклой формы произвольной конфигурации на любой орбите описывается одним нестационарным дифференциальным уравнением теплообмена вида [8]

$$C_s\frac{dT}{d\tau}+\varepsilon(1-\varphi_s)\sigma T^4=Q_\Sigma; \quad C_s=\frac{c_0V}{S}=c_0L; \quad c_0=c\gamma; \quad Q_\Sigma=\mathrm{Q}_1+\mathrm{Q}_2+\mathrm{Q}_3. \tag{4}$$

где C_s – поверхностная плотность теплоемкости сферического КО, Дж/(м^2·К); T – температура КО; τ – текущее время; ε – степень черноты поверхности КО; φ_s – интегральный коэффициент облученности (ИКО) внешней поверхности КО подсветкой Земли; Q_Σ – суммарная поглощенная поверхностью КО удельная мощность излучения внешних источников (поток излучения Солнца Q_1, поток излучения Земли Q_2 и отраженный Землей солнечный поток Q_3); c_0, c, γ – соответственно объемная теплоемкость, удельная

теплоемкость и плотность материала КО; V – объем КО; S – площадь поверхности КО; L – определяющий размер КО.

Величины поглощенных наружной поверхностью КО удельных тепловых потоков в (4) определяются из соотношений

$$Q_1 = \alpha_s E \Phi f; \quad Q_2 = \varepsilon \varphi_s Q_0; \quad Q_3 = \alpha_s A E \varphi_k; \quad \Phi = S_m/S, \tag{5}$$

где α_s – коэффициент поглощения солнечного излучения покрытием на внешней поверхности наружного корпуса; $E = 1366$ Вт/м^2 [11] – солнечная постоянная; f – коэффициент, равный единице на солнечном участке траектории и нулю – на теневом; ε – степень черноты наружной поверхности КО; $Q_0 = 239$ Вт/м^2 [11] – поверхностная плотность мощности, излучаемая Землей; $A = 0{,}3$ [11] – альбедо Бонда Земли; φ_k – интегральный комбинированный коэффициент облученности (ИККО) внешней поверхности объекта подсветкой отраженного Землей солнечного излучения; Φ – отношение площади миделя S_m, т.е. проекции объекта на плоскость, перпендикулярную направлению на Солнце, к площади внешней поверхности КО S.

Для проведения конкретных расчетов по формулам (4)–(5) введем ограничения на параметры траектории и конфигурацию КО. Будем рассматривать солнечно-постоянную орбиту, что соответствует условию $f = 1$, и объект в виде сферической оболочки, что соответствует значению параметра $\Phi = 0{,}25$. Для сферической оболочки с постоянной толщиной стенки Δ определяющий параметр равен $L = \Delta$.

Для сферического объекта ИКО может быть представлен формулой [5]

$$\varphi_s = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{1 - \varphi_0}\right); \qquad \varphi_0 = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-2},$$

где φ_0 – локальный коэффициент облученности для площадки, лежащей в плоскости местного горизонта; h – высота КО над поверхностью Земли.

Для сферического объекта в плоскости терминатора ИККО можно выразить с помощью следующих соотношений [8]:

$$\varphi_k = \frac{x^2}{6\pi}(1 + F); \quad F = \frac{1}{x^3}\left[2(1 - x^2)A - (2 - x^2)B\right]; \quad A = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{Y} d\theta; \quad B = \int_0^{\frac{\pi}{2}} Y d\theta;$$

$$Y = \sqrt{1 - \varphi_0 \sin^2\theta}, \; x = (1 + 0{,}157H)^{-1}, \; H = \frac{h}{1000}.$$

В последней формуле h подставляется в километрах, а H – в тысячах километров.

Результаты расчетов

В качестве примера произведены расчеты для случая существенно вытянутой орбиты, когда $h_a = 40000$ км, $h_p = 600$ км. В этом случае $r_a = 46371$ км, $r_p = 6971$ км. По формулам (3) получим $a = 26671$ км и $e = 0{,}7387$. Для Земли $D = 2 \cdot 10^7$, а при данных значениях a и e получим $A = 2{,}37 \cdot 10^{-11}$.

В результате решения уравнения (1) после определения $\theta(\tau)$ и подстановки этой функции в (2) получена зависимость $r(\tau)$, а затем, после вычитания из нее величины R, определена зависимость $h(\tau)$, представленная на рис. 1.

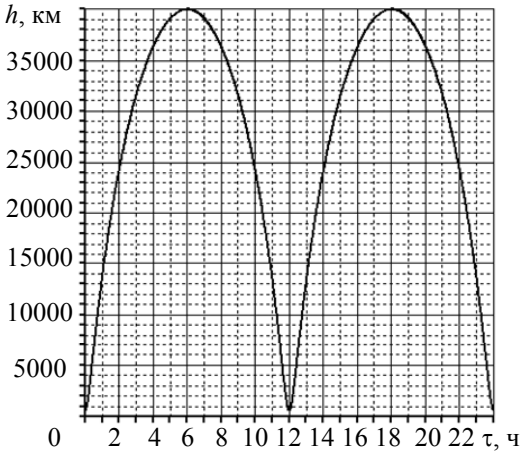


Рис. 1. Зависимость высоты орбиты космического объекта от времени при движении по эллиптической орбите

Как видно из рис. 1, значительное время (около 2 ч) КО находится в области геостационарной орбиты (h = 35000–40000 км), примерно столько же времени движется от перигея к области геостационарной орбиты и от нее к точке перигея. Время пребывания КО вблизи точки перигея весьма незначительно.

Период движения КО по орбите составляет около 12 ч. Время нахождения КО на высотах менее 5000 км составляет не более 1 ч, а на высотах менее 1000 км – около 12 мин. Таким образом, время нахождения КО вблизи точки перигея крайне незначительно.

На рис. 2 представлены зависимости от времени движения по эллиптической орбите в течение двух циклов величин удельных тепловых потоков Q_2 и Q_3. В общий поглощенный удельный тепловой поток Q_Σ в каждый момент времени добавляется постоянный удельный тепловой поток Q_1 = 341,5 Вт/м^2. Как видно из рис. 2, величина Q_3 (кривая 2) значительно меньше, чем Q_2 (кривая 1). Минимум в зависимости $Q_2(\tau)$ обусловлен тем, что коэффициент φ_k имеет максимум при высотах h = 1500–2000 км, после чего убывает [8].

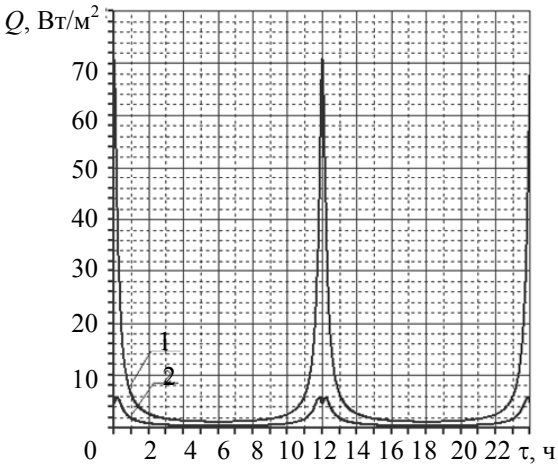


Рис. 2. Зависимость от времени падающего на сферический объект удельного теплового потока от Земли Q_2 (кривая 1) и отраженного Землей солнечного излучения Q_3 (кривая 2) при движении по эллиптической орбите

Расчеты нестационарных температур КО проводились для случая, когда его оболочка выполнена из сплава АМГ–6. В расчетах принимались следующие значения параметров: c = 922 Дж/кг К; γ = 2640 кг/м^3; c_0 = 2,43·10^6 Дж/(м^3·К); $\alpha_s = \varepsilon$ = 1. Начальная температура КО принималась равной 300 К.

Результаты расчетов представлены на рис. 3. При толщине стенки менее 100 мкм ход температурной кривой в каждом цикле воспроизводит изменение поглощенного суммарного удельного теплового потока в соответствии с данными рис. 2. По этой причине минимальное значение толщины стенки в расчетах принято равным 1 мм (кривая 1). Как видно из рис. 3, при этой толщине стенки ход зависимости $T(\tau)$ достаточно близок к эпюре изменения поглощенного удельного теплового потока. При толщине стенки 1 см (кривая 2) зависимость $T(\tau)$ запаздывает в процессе охлаждения по мере приближения к точке апогея относительно $Q_\Sigma(\tau)$. При весьма большой толщине стенки (5 см, кривая 3) зависимость $T(\tau)$ входит в режим периодически повторяющейся циклограммы изменения температуры только через пять циклов относительно начального первого периода.

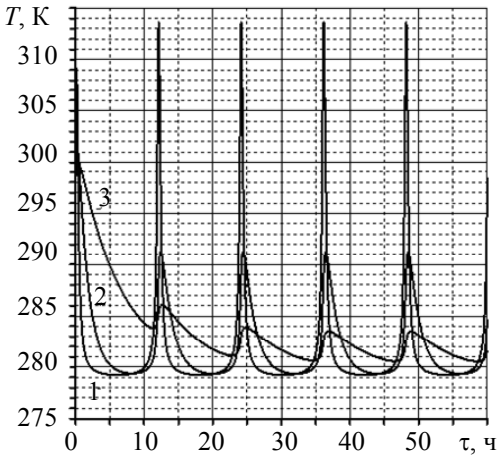


Рис. 3. Зависимость от времени средних температур оболочечного сферического объекта с объемной теплоемкостью 2,43·10^6 Дж/(м^3·К), движущегося по эллиптической траектории. Кривые соответствуют толщине стенки объекта: 1 – 1 мм; 2 – 1 см; 3 – 5 см

Обсуждение результатов

Алгоритм расчетов нестационарных температур КО, движущегося по эллиптической орбите, включает уравнения движения (1)–(2), уравнение нестационарного энергетического баланса (4) с учетом (5) и формулы для расчетов коэффициентов облученности φ_s и φ_k. Формула для расчета коэффициента облученности КО Землей имеет общий вид для любых параметров орбиты, а для комбинированного коэффициента облученности вид формулы зависит от параметров траектории.

Для вытянутой эллиптической орбиты вследствие большого перепада высот КО над поверхностью Земли (рис. 1) имеют место существенные изменения падающего на КО удельного теплового потока от Земли, при этом удельный поток отраженного Землей солнечного излучения на порядок меньше потока теплового излучения Земли (рис. 2).

Вследствие весьма короткого времени нахождения КО в области точки перигея, как видно из рис. 2, возрастание падающего на КО потока собственного теплового излучения Земли имеет импульсный характер, как и прирост температуры КО с малой термической инерцией (рис. 3).

Граница малой термической инерции определяется толщиной стенки оболочечного КО менее 1 мм, а КО с толщиной стенки менее 100 мкм является абсолютно безынерционным, при этом ход температурной кривой такого КО воспроизводит циклограмму изменения падающих потоков.

По мере увеличения толщины стенки КО (рис. 3) с ростом поверхностной плотности его теплоемкости амплитуда колебаний температур уменьшается, причем за счет уменьшения положительного прироста температуры, тогда как минимальное значение температуры при толщине стенки до 1 см сохраняется. При очень большой толщине стенки (5 см) минимальное значение температуры несколько повышается, а КО входит в режим периодически повторяющейся циклограммы изменения температуры только после пяти циклов относительно начального первого периода.

Из структуры уравнения (4) и формул для удельных тепловых потоков (5) следует, что тепловой баланс и определяемый им температурный уровень КО существенно зависят от степени черноты поверхности КО и ее коэффициента поглощения солнечного излучения. В проведенных расчетах поверхность КО принята абсолютно черной во всем спектре падающего излучения ($\alpha_s = \varepsilon = 1$). В этом случае поглощенные КО потоки равны падающим. Температура КО может быть существенно понижена за счет уменьшения величины α_s. Влияние степени черноты на температурный уровень имеет более сложный характер, поскольку она влияет как на поглощаемый поток собственного излучения Земли, так и на излучаемый в космическое пространство поток.

Заключение

В работе впервые предложена методика сквозных расчетов, содержащая определение высоты космического объекта над поверхностью Земли по параметрам траектории, расчет коэффициентов облученности, определяющих величины падающих на него удельных тепловых потоков от Земли и отраженного Землей солнечного излучения, а с учетом прямой солнечной засветки – полного теплового баланса космического объекта. Последним этапом расчетов является определение нестационарных температур космического объекта при движении по эллиптической орбите. Рассмотрен космический объект сферической формы, однако предложенный алгоритм расчета может быть распространен на другие выпуклые формы конструкции. Расчеты проведены на примере солнечно-постоянной орбиты. Авторы считают, что возможен расчет и при любом угле наклона орбиты космического объекта, при этом различие будет состоять только в методике расчета комбинированного коэффициента облученности космического объекта отраженным Землей солнечным излучением.

Предложенный алгоритм расчетов отличается от известных тем, что является компактным, требует минимальных затрат времени без потери точности вследствие простоты и универсальности математической модели. Разработанная методика расчета позволяет определять температуру космического объекта в любой точке орбиты в условиях его естественного теплообмена с окружающей средой в зависимости от его поверхностной плотности теплоемкости.

Литература

1. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. – М.: Наука, 1968. – 800 с.
2. Чеботарев Г.А. Аналитические и численные методы небесной механики. – М.; Л.: Наука, 1965. – 367 с.
3. Смарт У.М. Небесная механика. – М.: Мир, 1965. – 502 с.
4. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г.П. Петрова. – М.: Машиностроение, 1971. – 382 с.
5. Каменев А.А., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. – НТЦ им. Л.Т. Тучкова, 2006. – 186 с.

6. Cullimore B. et al. Automated Multidisciplinary Optimization of a Space-based Telescope. – SAE 2002-01-2445, July 2002. – 9 p.
7. John W. Pepi. Analytical Predictions for Lightweight Optics in a Gravitational and Thermal Environment // SPIE – the International Society for Optical Engineering. – 1987. – V. 748. – P. 172–179.
8. Баёва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Аналитическая методика расчета тепловых потоков в околоземном космическом пространстве, формирующих тепловой режим космических телескопов // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80. – № 5. – С. 30–37.
9. Баёва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Метод поддержания заданного температурного диапазона космического аппарата, движущегося по круговой орбите с заходом в тень Земли // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – № 7. – С. 56–61.
10. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
11. Trenberth K.E., Fasullo J.T. and Keihl J. Earth's global energy budget // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2009. – V. 90. – № 3. – P. 311–323.

Баёва Юлия Валерьевна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, yul.bayo@yandex.ru

Лаповок Евгений Владимирович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, научный сотрудник, Leva0007@rambler.ru

Ханков Сергей Иванович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Leva0007@rambler.ru

5 МЕХАНИКА И МЕХАТРОНИКА

УДК 531.383-11:681.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА ГРАВИМЕТРА НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

А.Н. Дзюба, Л.П. Старосельцев

Исследуется математическая модель индикаторного двухосного гиростабилизатора чувствительного элемента гравиметра в кардановом подвесе. В качестве чувствительных элементов гиростабилизатора используются волоконно-оптические гироскопы. Приведена схема моделирования погрешностей гиростабилизатора. Отмечены основные преимущества использования волоконно-оптических гироскопов по сравнению с гироскопами с механическим носителем кинетического момента. Математическая модель гиростабилизатора получена сочетанием безредукторной следящей системы и схемы косвенной акселерометрической коррекции. Схема коррекции представляет собой короткопериодную гировертикаль, демпфированную по скоростным измерениям с использованием аппаратуры потребителя спутниковой навигационной системы. Определено значение постоянной времени вертикали методом локальных аппроксимаций кривых спектральных плотностей ошибок волоконно-оптического гироскопа на фоне ошибок акселерометра и аппаратуры потребителя спутниковой навигационной системы. Определен вклад погрешностей чувствительных элементов системы стабилизации в суммарную погрешность, на основании чего сформулированы требования к ним.

Ключевые слова: гиростабилизатор, волоконно-оптический гироскоп, метод локальных аппроксимаций.

Введение

Для повышения точности гравиметрических съемок в условиях качающегося основания необходима стабилизация гравиметра в плоскости горизонта. В ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разрабатываются двухосные гиростабилизаторы (ГС) на основе поплавковых гироскопов (ПГ) [1]. Однако сложная технология производства ПГ вызывает необходимость использовать в ГС более дешевые волоконно-оптические гироскопы (ВОГ).

Среди преимуществ ВОГ по сравнению с ПГ выделяются: отсутствие вращающихся узлов в конструкции, что повышает надежность; пониженное энергопотребление и массогабаритные характеристики; малое время готовности; инвариантность к внешним ускорениям; работоспособность в условиях больших механических перегрузок. Преимущество использования ВОГ в системах стабилизации заключается в высокой стабильности масштабного коэффициента и отсутствии влияния неортогональности измерительных осей ввиду малого диапазона угловых скоростей.

Возможны два различных варианта реализации ГС гравиметра с использованием ВОГ. Первый предполагает размещение ВОГ и акселерометров непосредственно на стабилизируемой платформе. В этом случае стабилизирующим двигателем может быть сформирован сигнал управления в виде величины, пропорциональной как угловой скорости погрешности стабилизации, так и углу отклонения платформы от вертикали. Второй вариант построения ГС предполагает размещение ВОГ и акселерометров на качающемся основании в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы.

Основным требованием, предъявляемым к ГС гравиметров, является высокая точность стабилизации. ВОГ получил широкое распространение в системах стабилизации телекамер, однако применение дешевых ВОГ для этих целей ограничивает точность стабилизации, которая определяется случайной составляющей дрейфа, температурным дрейфом и высоким уровнем собственных шумов гироскопа. В связи с этим актуальным остается вопрос разработки высокоточных ВОГ с низким динамическим диапазоном и уровнем собственных шумов. В системах стабилизации гравиметра использование ВОГ предложено впервые [2].

Целью настоящей работы является исследование погрешностей первого варианта построения ГС на ВОГ. Методом математического моделирования получены оценки погрешностей ГС и выработаны требования к характеристикам ВОГ и акселерометров.

Математическая модель двухосного ГС на ВОГ

Для получения математической модели ГС введем следующие правые ортогональные системы координат (СК):

– горизонтная СК $0\xi\eta\zeta$, ориентированная по траектории (0η – вдоль проекции линейной скорости объекта на плоскость горизонта, 0ζ – по вертикали места, 0ξ – дополняет СК до правой);
– связанная СК $0x_c y_c z_c$ ($0y_c$ – продольная ось объекта, $0x_c$ – направлена в сторону правого борта, $0z_c$ – ортогонально плоскости палубы);

– платформенная СК $0xyz$ ($0x$ – ось вращения внутреннего кольца, $0z$ – ортогонально плоскости платформы, $0y$ – дополняет СК до правой).

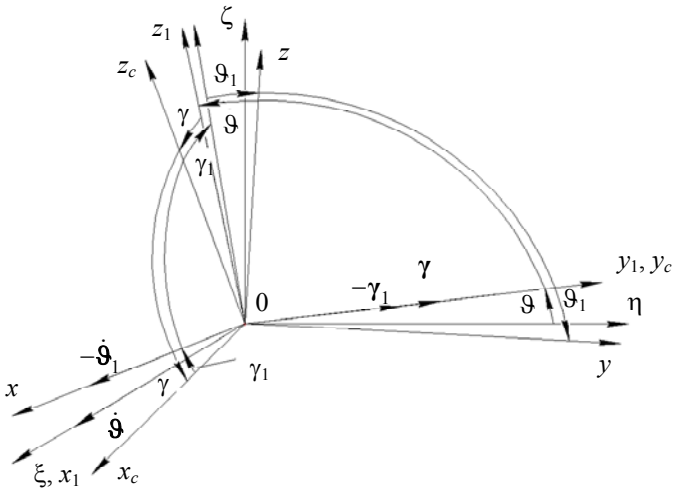


Рис. 1. Взаимная ориентация осей

Взаимная ориентация указанных СК представлена на рис. 1, где использованы следующие обозначения: ϑ, γ – углы дифферента, крена; ϑ_1, γ_1 – углы, снимаемые с датчиков угла по осям стабилизации, причем $\gamma_1 = \gamma - \beta$, $\vartheta_1 = \vartheta - \alpha$, α, β – погрешности стабилизации относительно поперечной и продольной осей соответственно, $\dot{\gamma}, \dot{\vartheta}$ – вектора угловых скоростей качки, $\dot{\gamma}_1, \dot{\vartheta}_1$ – вектора угловых скоростей вращения ротора стабилизирующего двигателя относительно статора, связанного с корпусом ГС.

С учетом справедливости соотношений для переносной угловой скорости [3]

$$\Omega_\xi = \Omega\cos(\varphi)\sin К + \frac{V}{R}, \qquad \Omega_\eta = \Omega\cos(\varphi)\cos К$$

получим следующие выражения для сигналов управления ГС:

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_1 = \omega_x + \Delta\omega_x, \\ \dot{\beta}_1 = \omega_y + \Delta\omega_y, \end{cases} \tag{1}$$

где Ω, R – угловая скорость вращения и радиус Земли; φ – широта места; К – курс; $\omega_x = \dot{\alpha} + \omega_x^{пер}$, $\omega_y = \dot{\beta} + \omega_y^{пер}$ – проекции абсолютной угловой скорости на оси $0xyz$; $\Delta\omega_x$, $\Delta\omega_y$ – погрешности ВОГ; $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ – угловые скорости погрешностей ГС, $\omega_x^{пер} \approx \Omega_\xi$ и $\omega_y^{пер} \approx \Omega_\eta$ – составляющие переносной угловой скорости в осях $0xyz$. Из выражения (1) видно, что точность формирования сигнала управления зависит от погрешностей широты места, линейной скорости объекта и курса, а также дрейфа ВОГ.

Для анализа ГС разработана его структурная схема, полученная сочетанием безредукторной следящей системы (БСС) на ВОГ и схемы акселерометрической коррекции (рис. 2).

Схема акселерометрической коррекции необходима для устранения из сигналов ВОГ переносной угловой скорости, вызванной вращением Земли относительно инерциального пространства и вращением объекта относительно центра Земли при движении его по поверхности, а также для реализации отрицательной обратной связи, компенсирующей медленное отклонение платформы, обусловленное дрейфом ВОГ. В предлагаемой нами схеме в качестве внешней информации о скорости используются данные аппаратуры потребителя спутниковой навигационной системы (АП СНС), которые совместно с данными от акселерометров поступают на вход фильтра с передаточной функцией (ПФ) $F(p)$ (рис. 2).

На рис. 2 приняты следующие обозначения: Ax, Ay – блок-схема формирования сигналов поперечного и продольного акселерометров; ВОГx, ВОГy – блок-схема формирования сигналов поперечного и продольного ВОГ; ПК 1, ПК 2 – преобразователи координат; $\dot{\vartheta}, \dot{\gamma}$ – угловые скорости килевой и бортовой качек; $\Delta\omega_x, \Delta\omega_y$ – погрешности ВОГ; $\dot{\alpha}_c, \dot{\beta}_c$ – сигналы акселерометрической коррекции; $\dot{\vartheta}_1, \dot{\gamma}_1$ – угловые скорости вращения ГС относительно объекта; a_x, a_y – линейные ускорения; $\Delta a_x, \Delta a_y$ – погрешности акселерометров; $V_E^{СНС}$, $V_N^{СНС}$ – восточная и северная составляющие скорости, выдаваемые АП СНС; ΔV_E, ΔV_N – погрешности определения восточной и северной составляющих скорости; $W_{уп_1}(p)$, $W_{уп_2}(p)$ – передаточная функция усилительно-преобразовательного устройства (УПУ); J_x, J_y – сум-

марные моменты инерции на осях стабилизации; $k_д$ – коэффициент передачи двигателя, Н·м/В; $k_{ВОГ}$ – коэффициент передачи ВОГ, В·с/°; U_x, U_y – управляющие сигналы, В; $S_{ДВ}$ – коэффициент скоростного сопротивления двигателя, Н·м·с; $\frac{1}{p}$ – оператор интегрирования; $M_{Вx}, M_{Вy}$ – возмущающие моменты на оси стабилизации; g – ускорение силы тяжести.

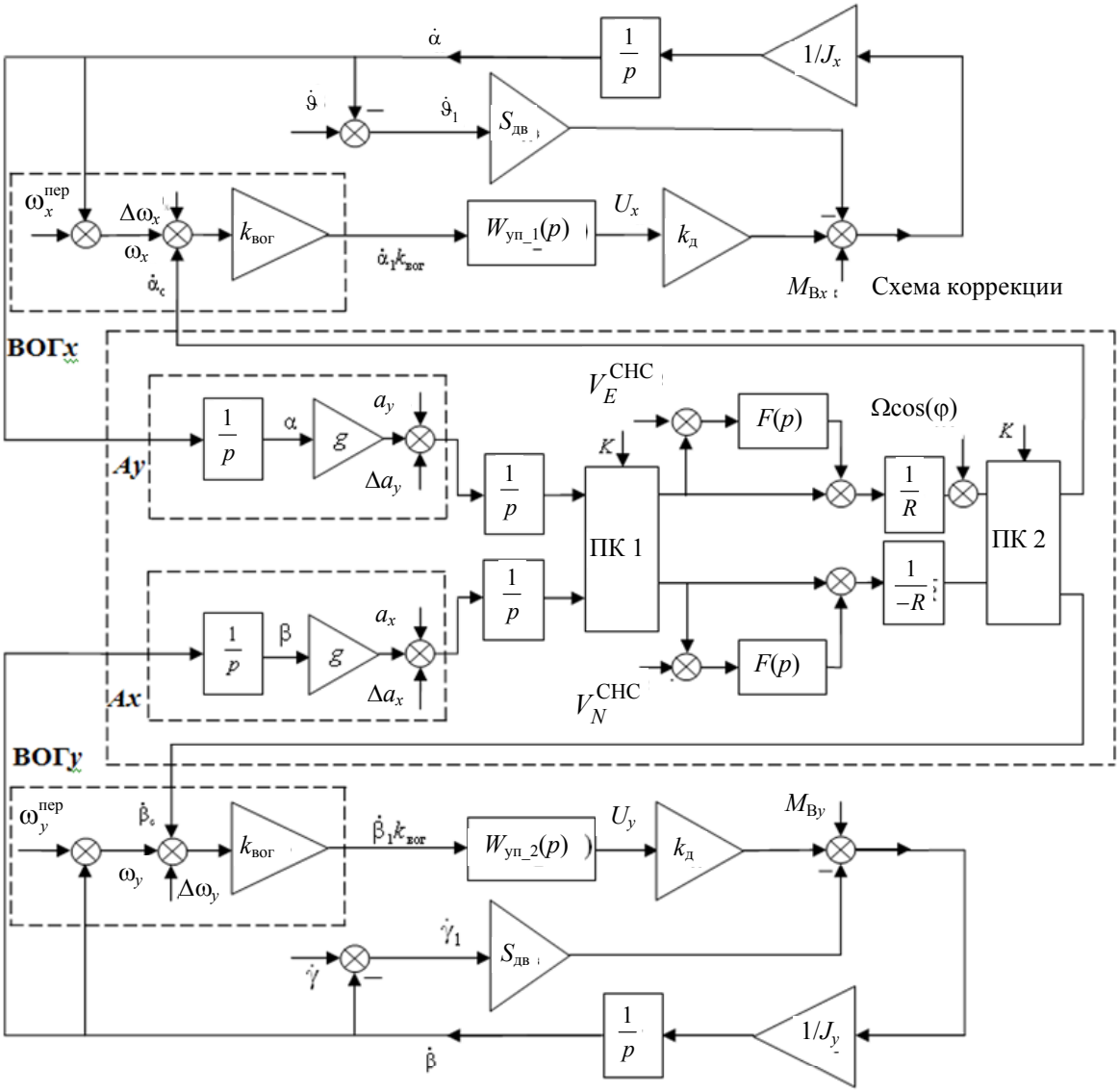


Рис. 2. Структурная схема двухосного ГС на ВОГ

Уравнение работы БСС при выключенной схеме коррекции составлено по методике, описанной в [4]. В частности, для канала стабилизации по оси y это уравнение имеет вид

$$J_y \beta p^2 + J_д(\gamma - \gamma_1)p^2 = M_{Вy} - M_{ДВy},$$

где $J_д$ – момент инерции ротора двигателя; $M_{Вy}$ – возмущающий момент на оси вращения наружного кольца, определяемый как сумма момента сил вязкого трения в шарикоподшипниковой опоре двигателя и момента от дисбаланса, вызванного остаточной погрешностью статической балансировки; $M_{ДВy}$ – момент, прикладываемый двигателем по оси подвеса наружного кольца.

В случае статической системы, когда сигнал управления пропорционален угловой скорости, передаточная функция УПУ может быть записана в виде [4]

$$W_{уп}(p) = \frac{K_у(1+T_2 p)}{(1+T_1 p)(1+T_3 p)}, \qquad (2)$$

где $K_у$ – коэффициент усиления; T_1, T_2, T_3 – постоянные времени преобразующей цепи БСС.

Постоянные T_1, T_2, T_3 в выражении (2) получены исходя из величины моментов инерции колец карданова подвеса, а также параметров движения носителя, при которых должна соблюдаться требуемая точность построения вертикали [4].

Анализ погрешностей контура акселерометрической коррекции погрешностей ГС проведем для установившегося режима. Это позволяет при построении фильтра с ПФ $F(p)$ воспользоваться подходом, получившим широкое применение при построении гироприборов [5, 6]. При синтезе этого фильтра в качестве полезного сигнала выступают погрешности ВОГ, которые выделяются на фоне ошибок акселерометра и АП СНС. Не останавливаясь на подробностях синтеза ПФ $F(p)$, воспользуемся результатами работы [1] и запишем:

$$F(p) = \frac{n^2}{2}\frac{2Tp+1}{0,5Tp+1},$$

где $n = \frac{T_{\text{Ш}}}{T}$, $T_{\text{Ш}}$ – постоянная времени Шулера; T – постоянная времени схемы коррекции.

Результаты математического моделирования погрешностей ГС

Рассмотрим влияние ошибок ВОГ, акселерометров и АП СНС ($\Delta\omega_y$, Δa_x на рис. 2), а также ошибки $V_N^{\text{СНС}}$ измерения линейной скорости объекта с использованием АП СНС (на рис. 2 не показана) на суммарную погрешность ГС с целью определения требований характеристик точности измерителей. Для этого зададимся следующей моделью их погрешностей: случайная составляющая дрейфа ВОГ, которая характеризует дрейф нуля в пуске, описана экспоненциально коррелированным процессом с параметрами $\sigma_{\text{Г}} = 0,1$ °/ч, $\alpha = 0,001$ 1/с, систематическая составляющая дрейфа, характеризующая смещение нулей от пуска к пуску – в виде случайной величины с уровнем (на интервале 1σ) – 3 °/ч. Использовались характеристики гироскопа ВОГ-035Q фирмы ФИЗОПТИКА. Схема коррекции (рис. 2), которая представляет собой короткопериодную гировертикаль, позволяет выделить и устранить систематическую погрешность ГС, обусловленную постоянным дрейфом гироскопа, неравенством моментов сил сухого трения при реверсном вращении платформы, а также моментом от дисбаланса.

Погрешность стабилизации β получена посредством численного интегрирования сигналов гироскопов, акселерометров и АП СНС. Для этого на соответствующие входы схемы, представленной на рис. 2, подавались случайные воздействия с заданными характеристиками.

Постоянная времени схемы коррекции, полученная с использованием метода локальных аппроксимаций [5], определяется классом точности ВОГ, уровнем шума акселерометров и среднеквадратическим отклонением (СКО) погрешности АП СНС и для приведенных данных составляет $T = 60$ с.

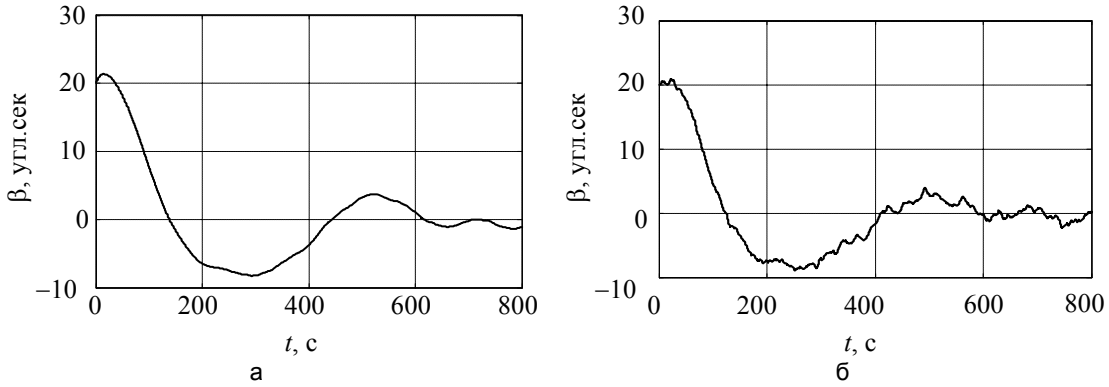


Рис. 3. Результат моделирования работы схемы коррекции: учет ошибок ВОГ (а), учет ошибок ВОГ, акселерометра и АП СНС (б); β(0) = 20″

На рис. 3, а, показан результат моделирования погрешности стабилизации, полученной при включенной схеме коррекции с учетом погрешностей ВОГ и при отсутствии погрешностей АП СНС акселерометров, а также при наличии погрешности начальной выставки $\beta(0) \neq 0$. На рис. 3, б, показан результат моделирования ошибки стабилизации при включенной схеме коррекции и наличии шумов акселерометра на уровне $q_W = 10^{-5} g$ м/(с·Гц$^{1/2}$), а также погрешностей АП СНС в виде экспоненциально коррелированного процесса с параметрами $\sigma_V = 10^{-2}$ м/с^2, $\mu = 0,5$ 1/с. Из графиков на рис. 3 видно, что основную составляющую погрешностей ГС вносит дрейф ВОГ, при этом время переходного процесса составляет около 10 мин.

Динамический диапазон ВОГ выбирается исходя из значения максимальной измеряемой угловой скорости

$$\Omega_{\max} = \frac{V_{\max}}{R} + \Omega + \dot{\alpha}_{\max} ,$$

где $V_{\max}$ – максимальное значение линейной скорости объекта; $\dot{\alpha}_{\max}$ – максимальное значение угловой скорости ошибки стабилизации. Отсюда видно, что динамический диапазон измеряемых угловых скоростей для морского объекта ($V_{\max}$ = 20–30 узлов) составляет около 1 °/с.

Для определения требуемого значения порога чувствительности ВОГ зададимся максимально допустимым значением динамической погрешности, вызванной влиянием зоны нечувствительности на уровне 2″. Проанализируем поведение платформы на качающемся основании в наиболее неблагоприятных условиях ($A = 15^\circ$, $T_k = 20$ с. На рис. 4 представлена зависимость динамической погрешности стабилизации, обусловленной зоной нечувствительности ВОГ. Из рис. 4 видно, что погрешность в 2 угл. сек обеспечивается для порога чувствительности на уровне 0,4 °/ч.

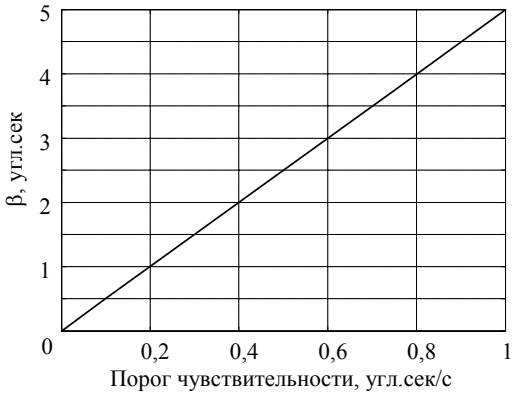


Рис. 4. Номограмма расчета порога чувствительности ВОГ

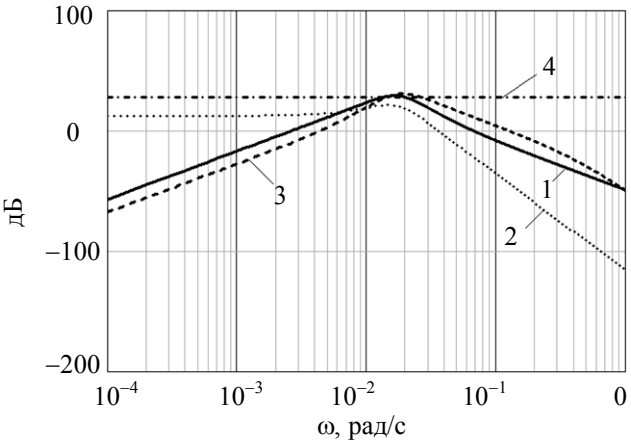


Рис. 5. Спектральные плотности погрешностей ГС, порожденных погрешностью ВОГ – $S_{\beta 1}(\omega)$ (1); погрешностью акселерометра $S_{\beta 2}(\omega)$ – (2); погрешностями АП СНС $S_{\beta 3}(\omega)$ – (3); S_u – допустимая верхняя граница спектральной плотности погрешности ГС (4), которая выбирается исходя из допустимой динамической ошибки стабилизации (дисперсия $(25'')^2$ на временном интервале 1 с)

Для определения требований по уровню собственных шумов приведем все шумовые составляющие погрешностей ВОГ, акселерометра и АП СНС к выходу схемы на рис. 2 по погрешности стабилизации β согласно соотношению

$$S_{\beta i}(\omega) = \left| W_i^{\beta}(j\omega) \right|^2 S_i(\omega) ,$$

где $W_i^{\beta}(j\omega)$ – ПФ от входа соответствующей погрешности к погрешности ГС β; $S_i(\omega)$ – спектральная плотность погрешности датчика (i =1, 2, 3 соответствует погрешности ВОГ, акселерометра, АП СНС); $S_{\beta i}(\omega)$ – спектральная плотность погрешности ГС, обусловленная шумовой составляющей погрешности на i-м входе. Как видно из рис. 5, максимальное значение спектральной плотности погрешности ГС достига-

ется на частоте резонанса системы, поэтому ограничение уровня шумов целесообразно проводить именно для этой частоты.

В таблице представлены допустимые уровни шумов ВОГ и акселерометров, а также СКО погрешностей АП СНС в выработке линейных скоростей.

	ВОГ, $°/\sqrt{ч}$	Акселерометр, м/(с^2·Гц$^{1/2}$)	АП СНС $\sigma_{V_{max}}$, м/с
Допустимый уровень шума или СКО, q	2×10^{-3}	2×10^{-5} g	10^{-2}

Таблица. Допустимые уровни шумов датчиков и СКО АП СНС

Статическая погрешность стабилизации обусловлена точностью акселерометра в определении составляющих линейных ускорений (неустраненным дрейфом нуля $\delta A_д$ и порогом чувствительности $\delta A_{пч}$). При допустимой статической погрешности на уровне $\delta A_{доп} = 30''$, сумма порога чувствительности и неустраненного дрейфа не должна превышать $\delta A_{доп} = [\delta A_{пч} + \delta A_д] \le g\beta^{ст}_{max} = 0{,}0014$ м/с^2.

Заключение

Основные результаты работы состоят в следующем:

- разработана математическая модель гиростабилизатора на ВОГ;
- определен вклад ошибок чувствительного элемента в суммарную погрешность гиростабилизатора;
- разработана система коррекции погрешностей ВОГ;
- выработаны требования к характеристикам точности ВОГ и акселерометров: динамический диапазон ВОГ – 1 °/с, порог чувствительности – 0,4 °/ч, уровень собственных шумов – не более 2×10^{-3} $°/\sqrt{ч}$, погрешности акселерометра – не более $0{,}0014$ м/с^2.

Разрядность аналого-цифрового преобразователя сигнала ВОГ определяется как логарифм отношения верхней границы динамического диапазона к нижней:

$$n = \log_2\left(\frac{3600}{0{,}4}\right) = 14 .$$

Величины угловых скоростей, которые могут измерять ВОГ, имеют нижний порог чувствительности, ограниченный уровнем собственных шумов, поэтому повышение точности стабилизации возможно за счет увеличения чувствительности ВОГ в области низких угловых скоростей и уменьшения уровня собственных шумов за счет использования конструкции с замкнутым контуром.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 12-08-00835-а.

Литература

1. Краснов А.А., Тепляшин А.Н. Исследование погрешностей гиростабилизатора аэрогравиметра // Навигация и управление движением. Материалы VIII конференции молодых ученых. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – 386 с.
2. Дзюба А.Н., Старосельцев Л.П. Исследование путей создания двухосного гиростабилизатора гравиметра на волоконно-оптических гироскопах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: elektropribor.spb.ru/cnf/kmu2013/text/12.doc, свободный. Яз. рус. (дата обращения 08.2013).
3. Анучин О.Н., Емельянцев Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под ред. В.Г. Пешехонова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 390 с.
4. Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем стабилизации. – Л.: Судостроение, 1968. – 348 с.
5. Степанов О.А., Челпанов И.Б., Лопарев А.В. Использование частотно-временного подхода при решении задач обработки навигационной информации // Материалы пленарного заседания 5-й Российской мультиконференции по проблемам управления. – СПб, 2012. – С. 64–80.
6. Лопарев А.В., Степанов О.А., Челпанов И.Б. Использование частотного подхода при синтезе нестационарных алгоритмов обработки навигационной информации // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 3. – С. 115–132.

Дзюба Андрей Николаевич – Россия, Санкт-Петербург, ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер; СПбГЭТУ «ЛЭТИ», студент; an_nik_dzyuba@mail.ru

Старосельцев Леонид Петрович – Россия, Санкт-Петербург, ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, зав. лабораторией, staroseltsev@mail.ru

6 КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 007:681.512.2

СРЕДСТВА ТИПИЗАЦИИ И ПРАГМАТИКА ЯЗЫКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГ-МАСТЕР[1]

Д.В. Кудрявцев, Д.В. Кознов, Л.Ю. Григорьев

В настоящий момент активно развивается область управления архитектурой предприятия (Enterprise Architecture Management), направленная на структуризацию и преобразование деятельности бизнес-компаний и на целостное управление бизнесом. Технология ОРГ-Мастер является российской разработкой в этой области, применяемой на практике в течение последних пятнадцати лет. В работе представлены новые возможности языка моделирования ОРГ-Мастер, реализованные в последней версии программных средств – более строгая типизация и уточненная прагматика.

Ключевые слова: архитектура предприятия, моделирование архитектуры предприятия, онтологический инжиниринг, онтологии, бизнес-процессы, BPMN, UML, предметно-ориентированное моделирование, визуальное моделирование, модельно-ориентированная разработка, DSM-подход.

Введение

В настоящее время бизнес-организации вынуждены непрерывно развиваться и трансформироваться, чтобы реагировать на изменения рынка, среды, технологий или же для того, чтобы инициировать эти изменения. Для проведения целенаправленных, управляемых и успешных трансформаций принято выделять так называемую архитектуру предприятия (Enterprise Architecture, EA), которая отражает организацию (устройство) предприятия и предназначена для его анализа, проектирования изменений и преобразований [1–3]. Для моделирования EA (Enterprise Architecture Modeling) и дальнейшей работы с этими моделями используются специальные программные средства, которые в последнее время принято называть «инструменты управления архитектурой предприятия»[2] [4, 5]. В этих инструментах активно применяется визуальное моделирование, т.е. используются «чертежи, позволяющие точно изображать хорошо структурированную информацию в понятной форме» [6], и, следуя традиции программной инженерии, для их разработки создаются, в основном, графовые нотации[3]. Данная область в настоящий момент активно развивается, о чем свидетельствует, например, отчет Gartner Group за 2012 год о существующих на рынке EAM-инструментах. Однако до стандартизации в этой области пока еще очень далеко: так, например, лидеры этого рынка, продукты IBM Rational System Architect [9] и Mega [10] используют разные методологии и наборы диаграмм[4]. В этой области используются многочисленные языки моделирования, как созданные непосредственно для моделирования EA, так и взятые из смежных областей: это стандарты моделирования бизнес-процессов [11], язык моделирования архитектуры предприятия Archimate [12], карты стратегий [13], шаблон бизнес-модели Остервальдера [14] и средства инженерии знаний (mind maps, concept maps) [15], а также средства моделирования программного обеспечения, например, UML (Unified Modeling Language) [16] и многое другое. В работе [17] предпринята попытка создать классификацию визуальных языков моделирования, в связи с чем найдено и рассмотрено около пятидесяти различных типов нотаций, в монографии [18] проведен обзор средств визуализации знаний и также идентифицировано огромное количество нотаций и подходов. Трудности со стандартизацией в EAM происходят из-за большого разнообразия прикладных областей, где используется данный подход: мировой бизнес очень вариативен, существует большое количество точек зрения и подходов к ведению бизнеса, а также различаются задачи, решаемые с помощью EA[5].

---

[1] Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИИ 12-01-00415-а.

[2] управление архитектурой предприятия – Enterprise Architecture Management, EAM; соответствующие программные продукты – EAM-tools (EAM-инструменты).

[3] Т.е. нотации, основывающиеся на концепции математического графа – набора вершин, которые могут по-разному изображаться и которые соединяются линиями, т.е. дугами, которые также часто называют ребрами [7]..

[4] Самой стандартизованной подобластью EAM является моделирование бизнес-процессов (business process modeling, BPM) – здесь было создано несколько языков, которые в настоящий момент объединены стандарт комитетом OMG (Object Management Group) в рамках стандарта BPMN (Business Process Management Notation, обзор на русском языке стандартов в этой области и дальнейшие ссылки можно найти, например, в [11].).

[5] Если продолжить аналогию с программной инженерией, то даже в этой достаточно узкой по сравнению с бизнесом областью есть проблемы со стандартизацией визуального моделирования (другое распространенное название – модельно-ориентированная разработка, используемые англо-язычные термины – model-driven development, MDD, model-driven architecture, MDA). Приятый в конце 90-х г.г. прошлого века стандарт UML [16] к началу к началу 2000-х г.г. не оправдал надежд на универсальность [19] и в итоге так и не стал широко использоваться на практике. В итоге стал развиваться альтернативный подход – предметно-ориентированное моделирование (DSM-подход, Domain Specific Modeling, DSM) [20]; вот ряд исследований на эту тему, выполненных в России: [21–23].

В России в течение последних 20 лет активно развивается и используется на практике методология и комплекс программных средств ОРГ-Мастер [24–29]. ОРГ-Мастер не является коробочным программным продуктом и представляет собой программно-методический комплекс, предназначенный для оказания сервисов в области EAM для российских предприятий, акцентируясь на бизнес-моделировании[6]. Преимуществами данного комплекса являются развитые возможности работы с репозиторием модели, позволяющие систематизировать и интегрировать множество частных моделей и точек зрения на предприятие в рамках создаваемой для него EA. Таким образом, становится возможным не только создавать красивые картинки для начальников, но оперативно разрабатывать сложные и детальные модели различных предприятий, отделяя уровень внутреннего (рабочего) представления от внешнего, презентационного [25, 28]..

В настоящей работе представлены результаты ревизии языка моделирования ОРГ-Мастер. Эта ревизия была предпринята в связи с бурным развитием в последние годы EAM-средств [8, 31], а также в контексте создания новой версии средства программной поддержки ОРГ-Мастера. При этом авторы руководствовались следующими соображениями:

- старались вносить в язык черты, существенно увеличивающие его выразительную силу;
- вместе с тем стремились максимально сохранить исходную концепцию языка; эта концепция хорошо себя зарекомендовала на практике, она обладает целостностью и гибкостью, являясь плодом более чем двадцатилетней работы большого коллектива аналитиков и экспертов;
- в связи с этим, в частности, ограниченно вносили в язык различный «синтаксический сахар», стремясь в большей степени к интеграции с другими языками и нотациями через импорт/экспорт;
- в задачи авторов входила также формализация методологии бизнес-моделирования на уровне языковых средств;
- наконец, стремились упорядочить и формализовать сценарии использования языка.

Обзор языка

Язык моделирования ОРГ-Мастер является очень простым и компактным. В него не включены сущности предметной области архитектурного моделирования – они надстраиваются над языком «сверху», с помощью задания пиктограмм и типов, через структуру модели, а также с помощью библиотечных средств. Такой подход открывает широкие возможности по использованию ОРГ-Мастера как в различных проектах по разработке архитектуры предприятий (EA-проектах), так и в разных предметных областях. Фактически язык оказывается средством разработки произвольных онтологий [26, 28, 32, 33] не обязательно в области EAM. Главными конструкциями языка являются классификаторы и проекции, которые рассмотрены ниже.

Классификатор – это контейнер, который содержит дискретные, упорядоченные и иерархизированные элементы информации, которые, в свою очередь, описывают некоторый связный и достаточно однородный фрагмент предметной области. Информация, которая попадает в один классификатор, является однородной, поскольку основная задача классификатора – классифицировать, и это делается по принципу близости, похожести. Кроме того, классификатор позволяет упорядочить и дискретизировать (т.е. разбить на части) исходно непрерывную информацию, существующую в виде текстового документа или набора документов, а также в устной форме. Дискретные части, так называемые атомарные информационные единицы, хранящиеся в классификаторе, называются позициями. Дискретизация предметной области является важным шагом при проектировании архитектуры организации.

Процесс дискретизации информации в ОРГ-Мастере тесно связан с построением иерархии – в рассматриваемом информационном фрагменте выделяются разделы, которые, в свою очередь, могут содержать другие разделы, и т.д. «На дне» этой иерархии находятся листовые позиции.

Еще одним важным моментом упорядочивания и дискретизации информации является возможность задавать атрибуты. Требуется не только структурировать процессы, но также и описать их, т.е. определить для них набор свойств и заполнить значения этих свойств – важность, уровень зрелости и т.д. Иначе говоря, у позиций должны быть атрибуты. Атрибуты позиций описываются на уровне классификатора, для которого можно определить вид атрибута, присвоить ему имя и задать тип (числовой, текстовый, комментарий и т.д.). После этого у всех позиций данного классификатора появляется возможность задавать соответствующие значения атрибута. Можно сказать, что еще один атрибут каждой позиции – это ее имя, и туда можно помещать произвольный текст, но он не должен быть очень большим (несколько строк – не более).

Бывает, что в один классификатор попадают и вовсе разнородные объекты, не объединяемые в одну иерархию, но по каким-то причинам тесно связанные между собой. Например, в одном классификато-

[6] Другим фокусом в области EAM является разработка интегральной IT-архитектуры предприятия – единого видения всех IT-систем, которые должны автоматизировать деятельность данного предприятия. Сервисы в области бизнес-моделирования предприятий на основе ОРГ-Мастера оказываются Санкт-Петербургской компанией «Бизнес Инжиниринг Групп» [35].

ре вместе со стратегическими активами организации могут оказаться цели и стратегии, которые основываются на вышеуказанных стратегических активах – и это будут такие специальные позиции.

Для того чтобы отразить факт наличия в одном классификаторе неоднородной информации, в ОРГ-Мастере используются пиктограммы. Для всей модели отдельно определяется множество допустимых пиктограмм, с классификатором связывается набор пиктограмм, причем каждая позиция в классификаторе может иметь пиктограмму из этого множества.

Отметим, что классификатор с механизмом атрибутов и пиктограммы являются двумя разными способами типизации.

Рассмотрим теперь проекции и связи в ОРГ-Мастере. Проекция – это отношение между классификаторами, в рамках которого могут устанавливаться связи между позициями этих классификаторов. В этих связях могут участвовать как листовые позиции, так и разделы – в определении проекции не накладывается дополнительных ограничений на позиции, которые могут участвовать в связях. Например, классификатор «Процессы» может быть связан проекцией с классификатором «Ролевая структура», и это означает, что каждый процесс имеет ссылку на организационную роль, которая за него отвечает. Но также можно установить связь раздела «Процессы управления» классификатора «Процессы» и входящих в него элементов с организационными ролями. Это избыточность того же рода, что и атрибуты классификатора – одни и те же для позиций разного типа. Выходом здесь могло бы быть создание дополнительных ограничений в проекции на типы связываемых элементов (например, задание этих ограничений как ассоциаций между типами).

В ОРГ-Мастере можно создавать проекции произвольной арности – как правило, от 1 до 7, хотя количество участников в проекции не ограничено (оно, разумеется, не может быть нулем или отрицательным числом). Если несколько классификаторов соединены проекцией, то разделы и листовые объекты в них могут быть соединены связями (в этом смысле разделы от листовых объектов ничем не отличаются) – по одному от каждого классификатора. Иначе говоря, связь – это набор из элементов позиций соответствующих классификаторов.

Средства типизации

Одним из главных направлений модернизации языка было усиление типизации. С одной стороны, это было необходимо для дифференциации используемых при моделировании конструкций базового языка: оказалось, что, например, пиктограммы используются в различных смыслах – и как перечислимые типы для атрибутов, и как метки для позиций классификатора и связей в проекциях. Кроме того, развитие средств визуального моделирования в новой версии ОРГ-Мастера потребовало сквозной типизации всех конструкций – графические средства должны точно «знать», какие именно сущности необходимо визуализировать.

Итак, пиктограммы были названы типами и разбиты на следующие виды:

- тип позиции – возможность типизировать элементы классификатора;
- тип связей – возможность указывать определенный идентификатор связям в проекции;
- свободные атрибуты – возможность выбирать значение атрибута в классификаторе из преопределенного списка значений.

В каждой модели ОРГ-Мастера имеется справочник типов позиций, из которого можно выбирать подходящие типы, а при отсутствии таковых создавать новые. Этот список является деревом по отношению тип/подтип, каждый элемент которого (конечный и узловой) обязательно имеет текстовое значение и может иметь связанную с ним иконку.

В каждой модели ОРГ-Мастера имеется справочник типов связей. При создании проекции с ней связывается один или несколько типов связей, каждой связи назначается некоторый тип из этого списка. Тип связей используется при фильтрации в процессе разработки и генерации отчетов по модели.

Третий вид типов в ОРГ-Мастере – это свободные атрибуты, которые являются повторно используемыми перечислимыми типами. Свободный атрибут можно задавать в качестве типа у атрибута классификатора, выбирая для каждой позиции классификатора подходящее значение из списка допустимых, связанных с этим свободным атрибутом.

В языках программирования уже с 70–80-х г.г. прошлого века стало принято использовать строгую типизацию переменных. Однако в средствах моделирования ситуация с типизацией более гибкая – так, например, атрибуты в диаграммах классов UML могут не иметь типов, и в общем случае это не является ошибкой[7]. Необходимость строгой типизации, в общем случае – однозначно заданных связей между различными элементами языка моделирования, типами диаграмм и пр., на наш взгляд, должна так сказать, дозироваться, так как этот подход, с одной стороны, конечно, гарантирует корректность специ-

[7]Хотя при использовании UML совместно со средами разработки ПО (программного обеспечения) (т.е. с поддержкой генерации кода на Java, C# и пр.) это, безусловно, ошибка, о которой UML-пакеты обычно сообщают пользователям.

фикаций[8], но с другой стороны, делает процесс моделирования негибким, неудобным и очень громоздким[9].

Типы в ОРГ-Мастере используются во многом как метки при составлении выборок из модели при разработке отчетов, и в связи с этим строгий контроль типов не требуется. Но в новой версии ОРГ-Мастера они используются внешними графическими редакторами[10] и различными сторонними плагинами, которым нужно точно указать, какие именно элементы следует отображать и связывать на тех или иных диаграммах. Причем неточности здесь становятся причиной ошибок при работе этих средств.

Повышенный (по сравнению с прошлой версией языка) уровень строгости типового контроля введен в ОРГ-Мастере во многом для поддержки графических редакторов. Однако есть тип «Не задан», который проставляется для созданной позиции/связи автоматически и фактически позволяет элементам не иметь конкретного значения типа, хотя это считается не очень хорошим стилем. Тем не менее, это удобно, поскольку такой подход позволяет, например, выполнять процедуру множественного импорта элементов классификатора из сторонних источников – баз данных, таблиц Microsoft Excel и т.д.; после выполнения такого импорта в модели одномоментно появляется много разных позиций, и требовать от аналитика сразу же назначить каждому из них нужный тип нецелесообразно, так как в этот момент не ясно, какой у кого должен быть тип, останутся ли все они или некоторая их часть в данном классификаторе и т.д.; соответствующие типы лучше проставить позднее. В пакете ОРГ-Мастер предполагается реализовать валидацию модели на предмет наличия в ней типов «Не задан».

Еще одной новой чертой является разделение множества типов, связываемого с классификатором, на базовые и вспомогательные типы. Каждая позиция классификатора должна иметь строго один базовый тип и может также иметь несколько вспомогательных. Так, если получилось, что в одном классификатор попали единицы оборудования и виды должностей сотрудников (например, если классификатор описывает целиком какой-то департамент компании, и этот департамент небольшой, то может оказаться целесообразно создать один классификатор для такого департамента и поместить туда все[11]), то два этих вида позиций должны иметь различные базовые типы. Вспомогательные типы используются так же, как и пиктограммы позиций в прежней версии языка, кроме того, они позволяют строить сложные и нелинейные классификации – например, элемент организационной структуры предприятия может быть департаментом, а может – конкретной должностью сотрудника. Аналогичная возможность в объектно-ориентированном проектировании реализуется с помощью множественного наследования.

Наш механизм работы с типами, безусловно, не является надежным, в отличие, например, от поддержки типизации в языках программирования. В последнем случае для программы компилятор строит общее дерево, в рамках которого осуществляется статический контроль корректности, в том числе и контроль правильного использования типов. Репозиторий модели до некоторой степени является аналогом такого дерева, но слабым аналогом, позволяющим пользователю ошибаться, например, неправильно выбирать тип позиции (список допустимых типов для выбора может быть большим). В программе на языке программирования такая ошибка выявляется сразу же – начинаешь присваивать переменной, которую ошибочно определил как символьную, целое значение – компилятор сразу же сигнализирует об ошибке. Типы же элементов в ОРГ-Мастере используются не столь интенсивно и строго, поэтому многие ошибки определяются не автоматически, а «вручную» – при генерации отчетов и диаграмм по модели. Более того, такая практика проверки моделей (не только в смысле типов) широко используется аналитиками, работающими с программными средствами ОРГ-Мастера: аналитик ожидает увидеть в отчете или на диаграмме определенную картину, и если он видит что-то другое, то начинает разбираться с моделью. Такой уровень поддержки корректности вполне адекватен в нашей ситуации, так как цена ошибки здесь иная, чем в программировании, хотя, безусловно, в будущем мы приложим максимум усилий для автоматического обеспечения корректности работы с типами.

Уточнение прагматики: режимы использования языка

Следуя семиотической традиции, остановимся на измерении нашего языка моделирования, которое называется прагматикой и определяет способ его использования [38]. В ходе модернизации ОРГ-Мастера прагматика языка моделирования была уточнена и формализована путем выделения ролей пользователей этого языка (программных средств) и описания сценариев (режимов) их работы.

---

[8] Подробно достоинства строгой типизации в моделировании обсуждаются, например, в работе [34]..

[9] Кроме того, возможны и так называемые «ленивые» подходы проверки корректности спецификаций – т.е. ошибки позволяется делать (кто знает, может быть, это не ошибки, а незавершенные пока спецификации?), а после окончания моделирования (или в какой-то другой важный момент) производится пакетная валидация/верификация спецификаций (см. примеры в работах [35, 36]).

[10] Внешне редакторы – это средства диаграммного моделирования, созданные в рамках пакета ОРГ-Мастер для взаимодействия с клиентами, а также для реализации полнофункциональной графики. Внешние редакторы разработаны на базе Microsoft Visio и детально описаны в работе [37].

[11] Моделирование небольших предприятий и разработка небольших ЕА-проектов является отдельной очень интересной темой ЕАМ. На практике оказывается, что в этом случае целесообразно использовать несколько иные средства и подходы, в отличие от тех, которые используются в больших ЕА-проектах.

Для уточнения режимов использования программного продукта необходимо разделить уровни моделирования и ввести некоторые дополнительные понятия.

Язык моделирования ОРГ-Мастер является, по сути, метаязыком – моделирование ЕА не производится непосредственно в терминах этого языка, с помощью классификаторов и проекций, а выполняется посредством дополнительных понятий и сущностей, таких как «Цель», «Процесс», «Операция», Организационная роль». Последние задаются методологией ОРГ-Мастера, и в каждом конкретном проекте они могут уточняться и расширяться. Таким образом, достигается гибкость и компактность языка моделирования, а также гибкость средств бизнес-моделирования ОРГ-Мастера. Последние часто меняются в связи с бурным развитием области ЕАМ, а также уточняются и детализируются в связи с использованием ЕАМ в различных узких предметных областях (государственных корпорациях, правительственных органах, малом бизнесе и т.д.).

Методология (дополнительные понятия и сущности «поверх» языка ОРГ-Мастер) синтаксически оформляется с помощью опорных моделей [29, 39, 40]. Последние представляют собой специальные модели ОРГ-Мастера (т.е. их можно открывать и редактировать как обычные модели), но главное их предназначение – задавать структуру рабочих моделей, соответствующих конкретным ЕА-проектам (аналог схемы базы данных). Таким образом, при создании каждой новой модели в ОРГ-Мастере пользователю предлагается выбрать подходящую опорную модель, из которой в текущую, вновь создаваемую модель экспортируются состав и спецификации классификаторов, проекций, типов и отчетов.

На сегодняшний день создана опорная модель, определяющая основные сущности для моделирования архитектуры бизнес-предприятий [24, 40]. Было также создано 6 опорных моделей для моделирования федеральных органов власти и субъектов федерации [39][12]. В разработке находится еще одна опорная модель, ориентированная на архитектуру городского хозяйства [41]. В [42] описан проект по применению ОРГ-Мастера при разработке Web-системы в области русско-финских приграничных отношений. Для этого проекта не нашлось подходящей опорной модели, и все понятия и сущности создавались разработчиками проекта.

Авторами выделены следующие роли (сценарии) для использования языка ОРГ-Мастер (они также совпадают с ролями пользователей программных средств ОРГ-Мастер):

- «Методолог» – разработка и изменение опорных моделей;
- «Архитектор» – выбор и адаптация опорной модели при разработке конкретного ЕА-проекта;
- «Аналитик» – разработка ЕА-проекта: активная работа с базовым пакетом ОРГ-Мастер, т.е. создание позиций, связей, отчетов и т.д.;
- «Клиент» – ввод данных в модель ОРГ-Мастера посредством диаграмм (т.е. с помощью внешних редакторов) в рамках каркаса модели, созданного в режиме «Аналитик»; данная роль предназначается для работников компаний, для которых разрабатывается ЕА-проект, хотя при наличии квалификации и желания они также могут работать в рамках любой из перечисленных выше ролей[13].

В настоящий момент в новой версии пакета ОРГ-Мастер поддержаны только три режима – «Методолог», «Архитектор» и «Аналитик», причем первые два пока объединены в рамках одних и тех же функциональных возможностей ОРГ-Мастера и различаются только идеологически, в ролевом плане.

Заключение

В настоящей работе представлены новые возможности языка моделирования ОРГ-Мастер:

- усиление типизации – разделение используемых типов на типы позиций классификатора, типы связей в проекциях и свободные атрибуты, а также введение обязательной типизации всех элементов классификатора и связей в проекциях с поддержкой, однако, отложенной типизации через стандартный тип по умолчанию «Не задан» и валидацию модели на наличие в ней таких типов;
- выделение различных ролей и сценариев использования языка моделирования ОРГ-Мастер – «Методолог», «Архитектор», «Аналитик», «Клиент». Все представленные в работе результаты реализованы в программном средстве ОРГ-Мастер 2.0.

Также кратко рассмотрена область ЕАМ и проведены параллели развития средств моделирования в этой области со средствами визуального моделирования в программной инженерии.

Отметим дальнейшие направления развития языка моделирования ОРГ-Мастер:

- развитие графических средств моделирование и тесная их интеграция с языком моделирования ОРГ-Мастера;
- разработка технологии автоматизированной генерации, настройки и сопровождения порталов на основе моделей ОРГ-Мастера;

[12] Подробнее см. http://bigc.ru/government/modeling/.

[13] кроме роли «Методолог» – пока не было случаев, чтобы клиенты участвовали в разработке методологии ОРГ-Мастера.

– развитие метаредактора для удобной модификации и адаптации опорных моделей и лежащих в их основе онтологий (в том числе графическое редактирование); интеграция со стандартами Semantic web;
– развитие механизма для работы со средствами накопления и передачи знаний (так называемые справочники и референтные модели);
– разработка механизма интеграции модели с внешними источниками данных (в том числе неструктурированными) – обычно знания любой организации распределены по различным хранилищам, документам и головам людей, и все эти знания нужно учитывать при создании и сопровождении ЕА.

Литература

1. Данилин А., Слюсаренко А. Архитектура и стратегия. «Инь» и «Янь» информационных технологий предприятия // Интернет-Университет Информационных Технологий. – 2005. – 504 с.
2. Зиндер Е.З. Архитектура предприятия в контексте бизнес-реинжиниринга // Intelligent Enterprise. – 2008. – Ч. 1. – № 4. – С. 46; Ч. 2. – № 7. – С. 183.
3. Op'tLand M., Proper E., Waage M., Steghuis C. Enterprise Architecture: Creating Valueby Informed Governance. – Springer–Verlag, Berlin, Germany, 2009. – 146 p.
4. Калянов Г.Н. Архитектура предприятия и инструменты ее моделирования //Автоматизация в промышленности. – 2004. – № 7. – С. 9–12.
5. BucklS. 7 EAMtools: State-of-the-Art [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.hpi.uni-potsdam.de/hirschfeld/teaching/past/itua12/media/Itua12_07_EAMTools.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.09.2013).
6. Ross D.T. Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas // IEEE Trans. Software Eng. – 1977. – V. 3. – № 1. – P. 16–34.
7. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. – БХВ-Петербург, 2003. – 1104 с.
8. Bittler R.S. Magic Quadrant for Enterprise Architecture Tools. – Gartner, 2012. – G00234030. – 28 p.
9. Rational System Architect [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www-03.ibm.com/software/products/ru/ru/ratisystarch/, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.09.2013).
10. MEGA Studio User Guide. – 2-nd Ed. – MEGA International, November 2011. – 114 p.
11. Артамонов И.В. Описание бизнес-процессов: вопросы стандартизации // Прикладная информатика. – 2011. – № 3 (32). – С. 20–28.
12. Iacob M., Jonkers H., Lankhorst M., Proper E. & Quartel D.A.C. ArchiMate 2.0 – Specification: The Open Group, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pubs.opengroup.org/architecture/archimate2-doc/, свободный. Яз. англ. (дата обращения 08.09.2013).
13. Каплан Р., Нортон Д. Стратегические карты. Трансформация нематериальных активов в материальные результаты. – М.: Олимп-Бизнес, 2012. – 446 с.
14. Остервальдер А., Пинье И. Построение бизнес-моделей. Настольная книга стратега и новатора: Пер. с англ. – М.: Альпина Паблишер, 2012. – 288 с.
15. Гаврилова Т.А., Лещева И.А., Кудрявцев Д.В. Использование моделей инженерии знаний для подготовки специалистов в области информационных технологий // Системное программирование. – Т. 7. – Вып. 1: Сб. статей / Под ред. А.Н.Терехова, Д.Ю.Булычева. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2012. – С. 90–105.
16. ФаулерМ. UML. Основы. Краткое руководство по стандартному языку объектного моделирования. – Символ-Плюс, 2011. – 192 с.
17. Kudryavtsev D., Gavrilova T. Diagrammatic Knowledge Modeling for Managers: Ontology-Based Approach. KEOD 2011 // Proceedings of the International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development. – 2011. – С. 386–389.
18. Самочадин А.В., Нурулин Ю.Р. Информационная поддержка публичных услуг. – СПб: БХВ-Петербург, 2013. – 160 с.
19. Dave A. Thomas: MDA: Revenge of the Modelers or UML Utopia? // IEEE Software. – 2004. – V. 21. – № 3. – P. 15–17.
20. Kelly S.,Tolvanen J.-P. Domain-Specific Modeling: Enabling Full Code Generation. – John Wiley&Sons, 2008. – 340 p.
21. Кознов Д.В. Разработка и сопровождение DSM-решений на основе MSF // Системное программирование. – 2008. – Т. 3. – № 1. – С. 80–96.
22. Сорокин А.В., Кознов Д.В. Обзор Eclipse Modeling Project // Системное программирование. – 2010. – Т. 5. – № 1. – С. 6–32.
23. Гуров В.С., Мазин М.А., Шалыто А.А. UNIMOD – инструментальное средство для автоматного программирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – № 7 (30). – С. 32–45.

24. Менеджмент по нотам: Технология построения эффективных компаний / Под ред. Л.Ю. Григорьева. – М.: Альпина Паблишер, 2012. – 694 с.
25. Grigoriev L., Kudryavtsev D. Non-diagrammatic method and multi-representation tool for integrated enterprise architecture and business process engineering // Proceedings of 15th IEEE Conference on Business Informatics (CBI 2013), 15–18 July. Vienna, Austria. – 2013. – P. 258–263.
26. Григорьев Л.Ю., Заблоцкий А.А., Кудрявцев Д.В. Технология наполнения баз знаний онтологического типа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». – 2012. – № 3 (150). – С. 27–36.
27. Kudryavtsev D., Grigoriev L. Ontology-based business architecture engineering technology // The 10th International Conference on Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques, September 28–30. – 2011. – P. 233–252.
28. Григорьев Л., Кудрявцев Д. Организационное проектирование на основе онтологий // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». – 2012. – № 1 (140). – С. 22–27.
29. Григорьев Л.Ю., Кознов Д.В., Кудрявцев Д.В. Обзор языка моделирования ОРГ-Мастер // Системное программирование. – Изд-во СПбГУ. – 2013. – Т. 8. – Вып. 1. – С. 5–34.
30. Бизнес-Инжиниринг Групп [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://bigc.ru/instruments/bigmasterpro/bm/om/, свободный. Яз. рус. (дата обращения 04.09.2013).
31. Berneaud M., Buckl S., Diaz-Fuentes A., et. al. Trends for Enterprise Architecture Management Tools Survey. – Technical report, 2012. – 144 p.
32. Гаврилова Т.А. Об одном подходе к онтологическому инжинирингу // Новости искусственного интеллекта. – 2005. – № 3. – С. 25–31.
33. Staab S., Studer R., eds. Handbook Ontologies. – Springer, 2009. – 811 p.
34. Terekhov A.N., Sokolov V.V. Implementation of the conformation of MSC and SDL Diagrams in the Real Technology // Programming and Computer Software. –2007. – T. 33. – № 1. – P. 24–33.
35. Кознов Д.В., Ольхович Л.Б. Визуальные языки проектов // Системное программирование. – 2005. – Т. 1. – № 0. – С. 148–167.
36. Вельдер С.Э., Шалыто А.А. Введение в верификацию автоматных программ на основе метода Model Checking // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 42. – С. 33–48.
37. Кознов Д.В., Кудрявцев Д.В., Григорьев Л.Ю., Гагарский Р. Концепция средств графического моделирования в технологии ОРГ-Мастер // Программная инженерия. – 2014. – № 2. – С. 15 –24.
38. Моррис Ч. Основы теории знаков / Под ред. Ю.С. Степанова // Семиотика. – М.: Радуга, 1983. – С. 37–90.
39. Кудрявцев Д.В., Григорьев Л.Ю., Кислова В.В., Жулин А.Б. Административное моделирование на основе онтологий // Вопросы государственного и муниципального управления. – 2009. – № 1. – С. 157–169.
40. Кудрявцев Д.В. Разработка моделей и методов обработки знаний в области организационного проектирования на основе онтологий: Автореф. Дисс. канд. техн. наук: 05.13.01; 05.13.11. – СПб: СПбГПУ, 2009. – 20 с.
41. Костырко А., Кудрявцев Д., Григорьев Л., Кислова В., Жулин А., Синятуллина Л., Ермаков Р. Моделирование комплексов городского хозяйства для системного развития ИКТ города // Сборник трудов конференции «Инженерия знаний и технологии семантического веба–2012», 1–9 октября 2012. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2012. – С. 81–88.
42. Кознов Д.В. Предметно-ориентированное визуальное решение для сбора и упорядочивания информации при разработке информационной Web-системы. Компьютерные инструменты в образовании, – 2013. – № 5 – С. 15–27.

Кудрявцев Дмитрий Вячеславович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, доцент; компания «Бизнес Инжиниринг Групп», ведущий консультант; кандидат технических наук, доцент, dmitry.ku@gmail.com

Кознов Дмитрий Владимирович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, кандидат физ.-мат. наук, доцент, dkoznov@yandex.ru

Григорьев Лев Юрьевич – Россия, Санкт-Петербург, компания «Бизнес Инжиниринг Групп», генеральный директор, griglev@gmail.com

УДК 681.3.08

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛОКАЛЬНОГО УЧАСТКА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА БАЗЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

П.В. Кустарев, С.В. Быковский

Исследованы измерительные схемы на цифровых элементах для контроля температуры кристаллов цифровых микросхем. Основным подходом является определение температуры по задержке сигнала на типовом логическом вентиле. Применяются различные варианты оценки задержки. Описаны преимущества и недостатки датчиков на базе кольцевых генераторов: высокая точность и скорость измерения, но малая локализация и плохая повторяемость параметров при реализации на программируемых логических интегральных схемах, высокие рабочие частоты, энергопотребление и уровень электромагнитных излучений. Предложено использовать альтернативную схему измерительного блока, реализующую статистический метод Монте-Карло. Суть схемы состоит в выделении областей задержки фронтов периодических импульсов при прохождении их через логический элемент и определении доли попаданий случайных тестирующих импульсов в эти области по отношению ко всему времени измерения. Таким способом рассчитывается задержка логического элемента, пересчитываемая в значение температуры. Результаты опытного исследования предложенной схемы подтвердили эффективность блока измерения задержек элементов по методу Монте-Карло для определения температуры кристалла, в том числе локальных перегревов около энергоемких функциональных блоков – процессоров, памяти и других. Предложенная схема показала точность измерений температуры не худшую, чем у схемы на кольцевом генераторе – на уровне 1,5 К, но имеет меньшую сложность и примерно на 25% меньше по занимаемой площади кристалла. Важной особенностью является возможность переноса и клонирования измерительного блока в различных точках кристалла без необходимости перекалибровки, что обеспечивает простоту его применения в аппаратно-реконфигурируемых системах на базе программируемых логических интегральных схем.

Ключевые слова: Time to Digital Conversion, TDC, VLSI, FPGA, SoC, ПЛИС, температурный датчик, кольцевой генератор.

Введение

В настоящее время для обеспечения контроля за температурным режимом цифровых микросхем сверхбольшой интеграции (VLSI) разработчики все чаще применяют реализованные на кристалле узлы измерения температуры (температурные датчики), построенные исключительно на цифровых элементах. Основное преимущество цифровых измерительных схем по сравнению с аналоговыми состоит в унификации процесса проектирования и производства микросхем. Датчики можно интегрировать в проект уже на этапе разработки модели устройства на уровне регистровых пересылок (RTL-уровень). Использование только цифровых элементов не приводит к изменению технологического процесса производства, в отличие от случая, когда в проект требуется интегрировать, помимо цифровых, еще и аналоговые блоки. Цифровые датчики можно пространственно объединить с энергоемкими блоками (память, процессоры, ускорители) вычислительных систем на кристалле (SoC), что позволяет не только оценить температуру кристалла, но и локализовать источник перегрева. Такие датчики реализуются как на базе заказных микросхем (ASIC), так и средствами программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) различных типов – FPGA, CPLD.

В большинстве случаев принцип функционирования цифровых датчиков основан на измерении задержки распространения сигнала через логический элемент. Зависимость задержки от нагрева элемента предоставляет возможность измерения температуры. Метод преобразования задержки в цифровое значение температуры (Time to Digital Conversion, TDC) является ключевой особенностью для каждого типа датчиков и будет во многом определять его показатели – разрешающую способность и точность, энергопотребление и саморазогрев, габариты, инерционность и способность к фиксации локальных перегревов кристалла микросхемы.

В современной литературе большое внимание уделяется цифровым датчикам на основе кольцевых генераторов (КГ) [1–4]. Принцип работы КГ-датчиков основан на зависимости выходной частоты генератора, которая определяется суммой задержек всех элементов в кольце генератора, от температуры окружающей среды.

Датчики на КГ имеют много достоинств: они способны осуществлять измерения с точностью до 1,5 К [5] при времени готовности данных не более 650 мкс. Достаточно высокое быстродействие достигается путем повышения рабочих частот КГ до 50 МГц и больше, что одновременно уменьшает количество элементов в кольце (чаще используется до 50 инверторов [1]) и площадь на кристалле.

С другой стороны, для точного измерения частоты КГ требуется высокочастотный и высокостабильный эталонный сигнал (обычно – это основной синхросигнал системы), что ограничивает применение компактных КГ-датчиков в устройствах, тактовая частота которых не превышает десятков мегагерц, или где применяются дешевые, но нестабильные тактовые генераторы, а также в устройствах, реализующих режимы пониженного энергопотребления с перестройкой тактовой частоты. Последнее касается в первую очередь автономных систем с батарейным питанием, притом, что контроль перегревов и переохлаждений для них важен в силу использования в широком диапазоне температур окружающей среды.

Кроме того, при использовании ПЛИС рабочие частоты не могут превышать 100–200 МГц, что также является ограничением на использование КГ-датчиков.

И, наконец, кольцевые генераторы являются источниками электромагнитных помех, что ограничивает их применение в прецизионных измерительных трактах.

Потенциально преодоление описанных ограничений возможно за счет использования альтернативных техник измерения задержки цифровых элементов. Но, хотя существует много подобных методов [6–8] (метод цикловой интерполяции, метод интегральных преобразователей нониусного типа, статистические методы), в литературе фактически не исследовано их использование для измерения температуры, не представлены варианты и параметры аппаратной реализации термодатчиков.

На кафедре вычислительной техники НИУ ИТМО было проведено исследование способов измерения задержек элементов на базе статистических методов, в частности – метода Монте-Карло, результаты которого представлены в диссертации С.О. Чураева [8]. Была продемонстрирована достижимость высоких показателей точности и скорости измерений, что явилось основанием для развития исследований в направлении построения цифровых термодатчиков. Достигнутые на сегодня результаты представлены в настоящей работе.

В работе показано, что на базе метода Монте-Карло можно строить измерительные узлы, не уступающие по точности КГ-датчикам. Представлена схема цифрового датчика, который имеет меньшие габариты и способен функционировать в системах с низкой и (или) динамически перестраиваемой тактовой частотой, эффективно реализуется на ПЛИС, не создает дополнительных электромагнитных помех.

Описание разработанной испытательной установки

Принцип и схема блока измерения задержек цифровых элементов на базе метода Монте-Карло подробно описаны в работах [6–8]. Он состоит в оценке вероятности попадания фронтов случайных тестирующих импульсов во временные области распространения (задержки) периодического сигнала в цифровом элементе. Данные области выделяются посредством логического умножения входного и выходного (задержанного) сигналов.

Для проведения экспериментов была разработана встраиваемая измерительная система (ВИС). Ядром ВИС являлся процессор, выполняющий сбор и сохранение данных с множества блоков измерения температуры в автоматическом режиме. К процессору посредством стандартной внутрикристальной шины (OCP 3.0) подключается множество блоков измерения температуры.

Структура блока измерения температуры представлена на рис. 1.

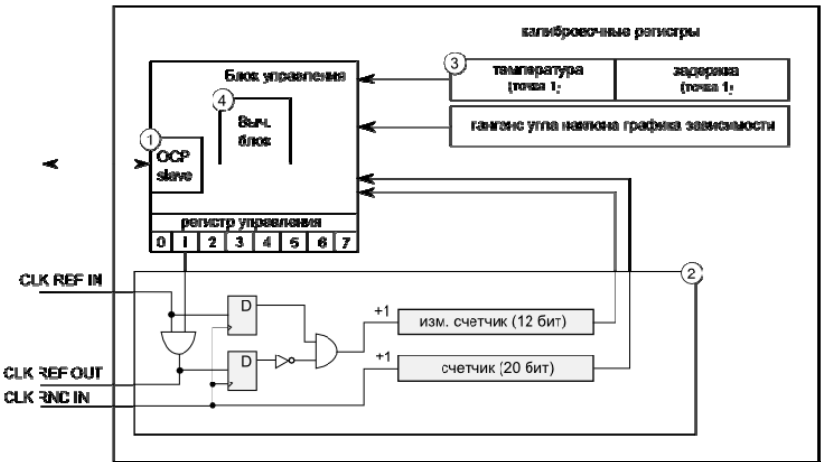


Рис. 1. Структурная схема блока измерения температуры: 1 – стандартный коммуникационный интерфейс OCP 3.0 для подключения датчика к процессору сбора данных; 2 – блок измерения задержек переднего фронта на цифровом элементе; 3 – блок калибровочных регистров; 4 – вычислительный блок интерполятора, предназначенный для расчета значения температуры по измеренной задержке

Для работы схемы, согласно методике измерений [6], необходимы два входных сигнала – опорный сигнал CLK REF IN (для эксперимента была установлена частота 50 МГц) и тестовый сигнал CLK RND IN (для эксперимента была установлена частота 1,8432 МГц). Источниками сигналов выступали кварцевые генераторы, расположенные на испытательной плате. Частоты были выбраны исходя из параметров генераторов используемой платы, но могут быть другими. Замена случайных тестирующих импульсов на периодическую допустима, но только при некратном значении частоты CLK RND IN по отношению к частоте CLK REF IN («плывущая фаза)», что обосновано в исследовании [8] и проверено авторским опытом. Период одного измерения при описанных технических решениях и достижении требуемой точности

измерений (см. далее) составил 75 мс, что больше времени измерения КГ-датчика, но не противоречит прикладной задаче.

Эксперименты проводились с использованием прототипной платы Spartan-3AN StarterKit фирмы Xilinx с ПЛИС XC3S700AN. В составе ВИС были задействованы 4 блока измерения температуры delay и 4 блока HS (hot spot), предназначенные для локального нагрева отдельных участков ПЛИС. Каждый блок HS состоял из 300 кольцевых генераторов. В процессе работы можно было выборочно включать и выключать блоки HS, управляя нагревом локальных областей кристалла ПЛИС и оценивая соответствующие изменения показаний термодатчиков. Размещение различных блоков ВИС на кристалле ПЛИС изображено на рис. 2.

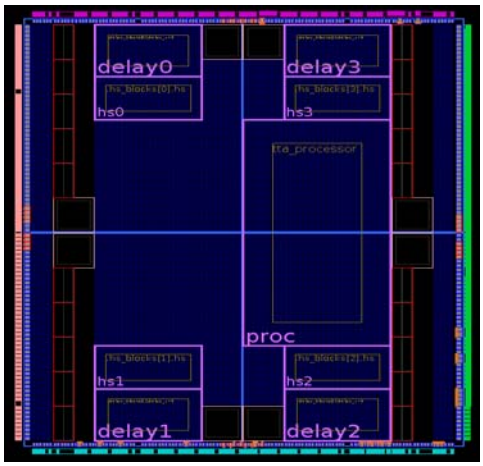


Рис. 2. Схема размещения блоков ВИС на ПЛИС

На рис. 3 показан результат размещения измерительного блока в ПЛИС. Датчик занял на ПЛИС 18 блоков (slice), при этом «элемент задержки» разместился в одном блоке, не используя внеблочных межсоединений. А именно межсоединения дают максимальную нестабильность задержки измерительной цепи при трассировке в ПЛИС и приводят к необходимости индивидуальной калибровки датчиков (см. ниже).

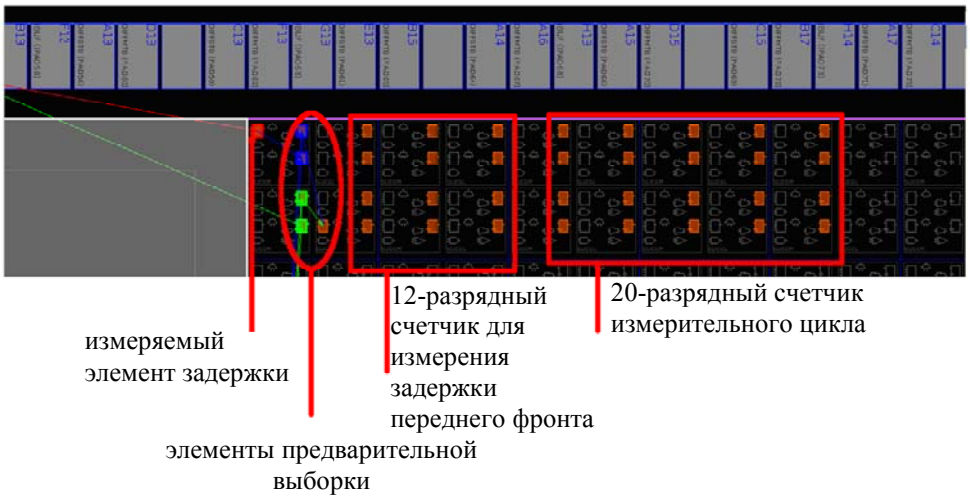


Рис. 3. Размещение блока измерения температуры в ПЛИС

В сравнении с полученным результатом измерительная часть датчика на кольцевых генераторах (47 инверторов), описанная в [1] и проверочно реализованная авторами, заняла 24 блока (slice) от ресурсов используемой ПЛИС (XC3S700AN). Таким образом, предложенный вариант оказался на 25% компактнее.

Результаты экспериментальных исследований цифрового датчика температуры

Анализ данных источников [1, 6–8], проработка схемы измерения температуры и оценка ее реализации на ПЛИС позволил авторам прогнозировать: достижима точность измерения температуры на уровне 1 К при рабочей частоте до 50 МГц (что соответствует нижнему пределу частот КГ). Измерительный элемент будет иметь на порядок меньшую область, занимаемую на кристалле, так как в типовом варианте он состоит из 1 вентиля против 47 вентилей у КГ-датчика [1]. Это позволит повысить локализа-

цию температурных измерений. Положительный эффект от локализации дополнительно усилится простотой «внедрения» измерительного элемента в функциональные блоки микросхем.

Проведенные экспериментальные исследования в целом подтвердили прогнозы.

На первом шаге была оценена зависимость задержки цифрового элемента от температуры. Для этого плата с ПЛИС была помещена в термокамеру, и измерялись задержки при температурах от –30С° до 60С°. Результаты представлены на рис. 4.

На графике показана зависимость от температуры задержки переднего и заднего фронтов импульсов эталонной частоты. Задержка выражена в условных единицах внутреннего счетчика схемы, т.е. не имеет погрешности преобразования в единицы времени, и именно в таком виде она обрабатывается в ВИС. Если перевести задержку в единицы времени, то изменение задержки на 0,5 пс соответствует изменению температуры на 1К (достижимость пикосекундной точности измерений задержек продемонстрирована в [8]).

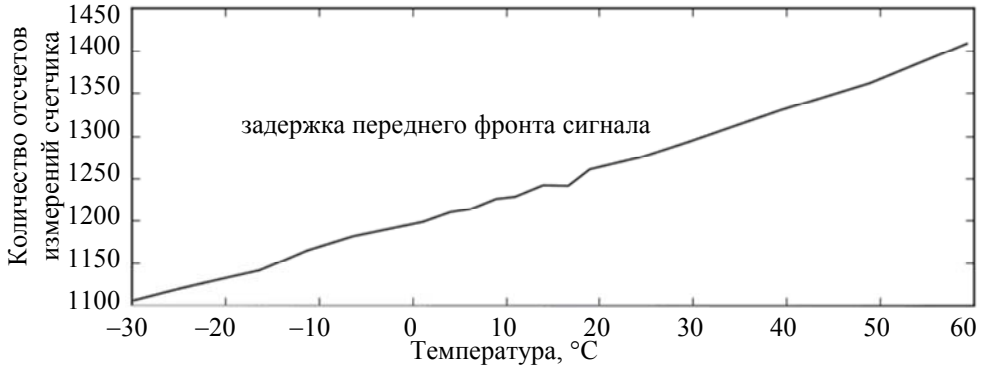


Рис. 4. Полученная зависимость задержки цифрового элемента от температуры

Была исследована повторяемость измерений: для 10 опытов максимальное абсолютное отклонение измеренных значений задержек при одинаковой температуре составило 2 пс, что при переводе в температуру составит (2 пс)/(0,5 пс/К) = 4 К.

Изменение внутренней схемотехники измерительного блока, типа измерительного элемента и (или) параметров синтеза и планирования топологии ПЛИС ведет к изменению задержки. Это обусловлено различной топологией (внутренней трассировкой) измерительных блоков на кристалле ПЛИС. В этой связи необходимо произвести калибровку измерительного блока. В общем случае следует калибровать каждый конкретный датчик, но, в силу компактности предложенного измерительного блока, легко однократно зафиксировать его трассировку в типовом блоке ПЛИС (задержка при этом также будет неизменной) и отображать данную трассировку без изменения на аналогичные блоки в ПЛИС, расположенные в других частях кристалла. В качестве калибровочных данных авторами были использованы значение «измерительного» счетчика при определенной температуре и коэффициент пропорциональности для зависимости задержки от температуры (угол наклона графика на рис. 4).

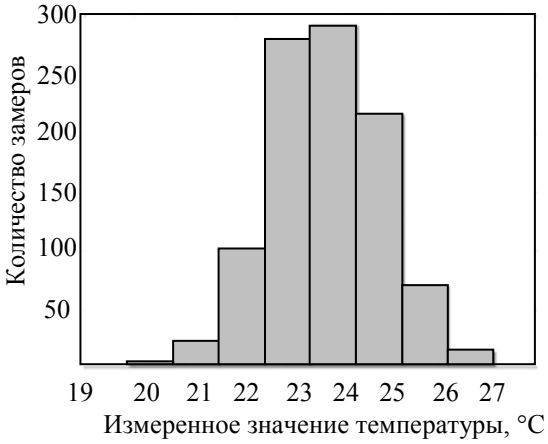


Рис. 5. Гистограмма распределения измеренных значений температуры

Следующим шагом была оценка погрешности измерений температуры калиброванного датчика. На рис. 5 приведена гистограмма распределения результатов 1000 последовательных замеров температуры при постоянной температуре окружающей среды 24ºС. Среднее квадратичное отклонение полученных значений температуры составило 1,25 К. Согласно правилу трех сигм, 99% значений нормально рас-

пределенной случайной величины будет лежать в диапазоне M±3,75 К, где M – математическое ожидание. Таким образом, максимальное отклонение от номинального значения температуры можно считать примерно равным 4 К. Этот результат соответствует продемонстрированной выше повторяемости измерений.

Уменьшить максимальный разброс можно с помощью скользящего арифметического (1) или экспоненциального (сглаженного) (2) усреднения:

$$t_{a.n} = \frac{\sum_{i=n-N-1}^{n} t_i}{N}, \quad (1)$$

$$t_{s.n} = k \cdot t_n + (1-k) \cdot t_{s.n-1}. \quad (2)$$

Результаты различных вариантов усреднения представлены в табл. 1, 2.

Согласно табл. 2 и правилу трех сигм, максимальный разброс показаний датчика можно уменьшить до 1,5 К ($\Delta T_{\max} = \sigma \times 3$), используя экспоненциальное усреднение с коэффициентом 0,25. При этом такой вариант может быть реализован аппаратно простейшими операциями сдвига и суммирования.

N	Σ, К
2	0,63
5	0,25
7	0,17
15	0,088

Таблица 1. Результаты арифметического усреднения по N замерам

k	σ, К
1	1,25
0,75	0,94
0,25	**0,5**
0,1	0,32

Таблица 2. Результаты экспоненциального усреднения

В завершение была оценена способность к измерению локальных перегревов кристалла ПЛИС. Для этого поочередно включались блоки HS, размещенные в различных углах кристалла (рис. 2). В начале эксперимента температура окружающей среды и кристалла была установлена равной 21ºС. На рис. 6 изображены карты распределения температуры на кристалле ПЛИС. Карты строились на основе показаний 4 датчиков. Значения температуры в точках кристалла, температура которых непосредственно не измерялась, были восстановлены с помощью линейной интерполяции.

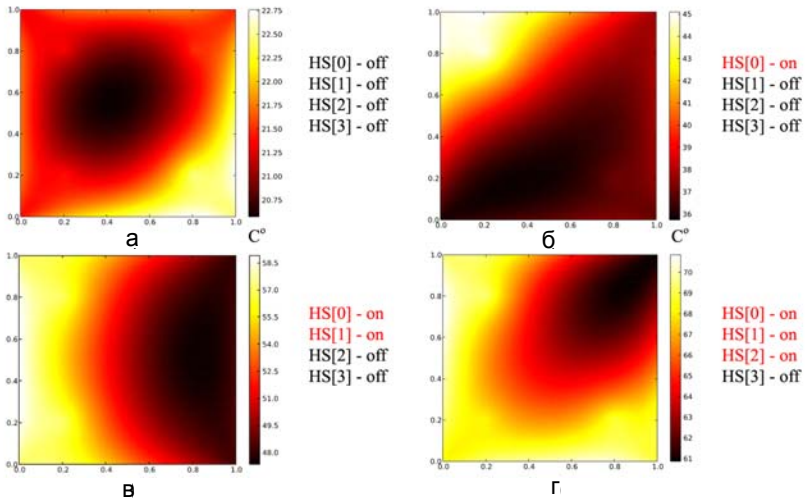


Рис. 6. Распределение температуры на кристалле ПЛИС: при отключенных блоках нагрева HS (а); при включении: одного блока HS (б); 2-х блоков нагрева HS (в); 3-х блоков нагрева HS (г)

На рис. 6, а, видно, что при отключенных блоках нагрева HS температура различных точек кристалла примерно одинакова и находится в диапазоне от 20ºС до 22ºС. При точечном нагреве в одной точке, когда включен блок HS [0] (рис. 6, б), температура в этой точке достигает 45ºС и превышает темпера-

туру в остальных точках кристалла на 9ºС. При включении 2 и 3 блоков нагрева HS (рис. 6, в, и рис. 6, г) средняя температура кристалла возрастает примерно на 12ºС на каждый включенный блок HS, но перегрев точек нагрева сохраняется на уровне 9ºС, что в целом соответствует физике процесса нагрева. Тем самым подтверждено, что датчики смогли идентифицировать неравномерность распределения температуры на кристалле ПЛИС.

Таким образом, предлагаемый измерительный блок позволил определять отклонения температур локальных областей ПЛИС на 4 К.

Малые размеры измерительной части датчиков (рис. 5) и низкие частоты работы (порядка 2 МГц) позволяют реализовать измерительную сеть, обладающую более высокой пространственной разрешающей способностью, чем в случае с датчиками на кольцевых генераторах. Детальный анализ пространственной и температурной разрешающей способности сети датчиков является темой для будущих исследований.

Заключение

Основным научным результатом, полученным авторами данной работы, является экспериментальная оценка эффективности техники измерения задержек по методу Монте-Карло в качестве основы для построения цифрового температурного датчика, способного измерять локальные перегревы кристалла цифровых микросхем. В работе был предложен и проанализирован вариант реализации такого цифрового датчика. Описанный подход позволил проводить измерения температуры с точностью в 1,5 К при усреднении всего двух замеров (использовалось экспоненциальное усреднение). Это сравнимо с точностью датчиков на кольцевых генераторах (1–1,5 К). Опытным путем подтверждена возможность измерения локальных перегревов на кристалле.

На данном этапе исследований и для использованной авторами испытательной установки температурные датчики на основе кольцевых генераторов показали большую скорость измерений (650 мкс на одно измерение) [5]. Однако для предлагаемой в работе схемы существует потенциал улучшения ее скоростных характеристик за счет изменения соотношения частот тестового и опорного сигналов, а также за счет увеличения частоты тестового сигнала.

Следует отметить, что на практике скорость температурных измерений не всегда обладает наивысшим приоритетом: температурные процессы сами по себе являются достаточно инерционными. Предпочтение отдается компактности и малому энергопотреблению измерительных схем. В работе показано, что измерительная часть предложенной схемы датчика на 25% компактнее датчиков на кольцевых генераторах (КГ-датчиков).

КГ-датчики имеют достаточно высокие рабочие частоты при большом числе переключающихся элементов (до 50 шт.), что ведет к дополнительным энергопотерям и возможности саморазогрева измерительного элемента. В предлагаемой схеме датчик имеет измерительную цепь только из одного переключающегося элемента.

КГ-датчики не могут корректно функционировать при уменьшении эталонной частоты, например, при переходе системы в режим пониженного энергопотребления, что потребует минимальных изменений измерительной схемы. В предлагаемой схеме датчика важно не абсолютное значение, а соотношение тактовых сигналов (тестового и опорного), частоту которых можно изменять, сохраняя структуру измерительного блока неизменной. Однако детальное исследование повторяемости результатов при изменении частоты тактовых сигналов является задачей отдельного исследования.

Описанные исследования выполняются на кафедре вычислительной техники НИУ ИТМО в рамках развития научно-исследовательского направления «Системотехника интегральных вычислителей. Системы на кристалле». Полученные результаты апробированы в рамках ряда инновационных проектов, реализуемых кафедрой вычислительной техники и научно-производственной фирмой ООО «ЛМТ».

Литература

1. Ruething C., Agne A., Happe M., Plessl C. Exploration of ring oscillator design space for temperature measurements on FPGAs // Field Programmable Logic and Applications (FPL), 22nd International Conference on. – 2012. – P. 559–562.
2. Zick K.M., Hayes J.P. On-line sensing for healthier FPGA systems // FPGA'10 Proceedings of the 18th annual ACM/SIGDA international symposium on Field programmable gate arrays. – 2010. – P. 239–248.
3. Lopez-Buedo S., Garrido J., Boemo E.I. Dynamically inserting, operating, and eliminating thermal sensors of FPGA-based systems // Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on. – 2002. – V. 25. – № 4. – P. 561–566.
4. Lopez-Buedo S., Boemo E.I. Making visible the thermal behaviour of embedded microprocessors on FPGAs: a progress report // Proceedings of the 2004 ACM/SIGDA 12th international symposium on Field programmable gate arrays (FPGA'04). – 2004. – P. 79–86.

5. Poki C., Mon-Chau S., Zhi-Yuan Z, Zi-Fan Z., Chun-Yan C. A Fully Digital Time-Domain Smart Temperature Sensor Realized With 140 FPGA Logic Elements // Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on. – 2007. – V. 54. – № 12. – P. 2661–2668.
6. Maggioni S., Veggetti A., Bogliolo A., Croce L. Random Sampling for On-Chip Characterization of Standard-Cell Propagation Delay // Proceedings of the 4th International Symposium on Quality Electronic Design. – 2003. – P. 41–45.
7. Churayev S.O., Matkarimov B.T., Paltashev T.T. On-chip measurements of standard-cell propagation delay // Design & Test Symposium. – 2010. – P. 179–181.
8. Чураев С.О. Встраиваемые системы контроля параметров интегральных схем пикосекундного разрешения: Дис. … канд. техн. наук. – СПб, 2012. – 154 с.

Кустарев Павел Валерьевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, kustarev@yandex.ru

Быковский Сергей Вячеславович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, bsv.serg@gmail.com

УДК 681.324

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ТОПОЛОГИИ СЕТИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Е.В. Книга, И.О. Жаринов

Рассматриваются принципы сетевой организации бортовых цифровых вычислительных систем. Наиболее распространенные сегодня на практике сетевые топологии, которыми являются «двойная звезда» и «общая шина», не отвечают основным требованиям сетевой организации, предъявленным к вычислительным системам перспективных летательных аппаратов согласно концепции интегрированной модульной авионики. Предлагается новое техническое решение для построения отказоустойчивой вычислительной системы, основанное на использовании смешанной топологии, которая совмещает в себе элементы двух известных топологий – «полносвязная сеть» и «двойная звезда». Данное техническое решение позволяет улучшить показатели качества работы вычислительной системы. В работе особое внимание уделено показателям надежности вычислительной системы, построенной по принципу смешанной топологии, при различных способах назначения выполняемых задач на доступные вычислительные ресурсы. Результатом практической реализации предложенной топологии бортовой цифровой вычислительной системы является ее структура, внедренная в реальную практическую разработку в авиационной промышленности.

Ключевые слова: сетевые технологии, интегрированная модульная авионика, вычислительные системы.

Введение

В соответствии с современными тенденциями развития авионики бортовые цифровые вычислительные системы (БЦВС) представляют собой многомашинные вычислительные комплексы, интегрированные в единый конструктив. За счет использования свойств интеграции реализуется возможность практически неограниченного увеличения производительности систем путем включения в них дополнительных вычислительных модулей. Свойства интеграции проявляются в полной мере при соблюдении следующих требований к сетевой организации БЦВС [1–4]:

- должны использоваться открытые стандарты на аппаратное и программное обеспечение;
- топология вычислительной сети БЦВС должна быть масштабируемой;
- топология вычислительной сети БЦВС должна поддерживать высокий уровень взаимосвязанности;
- сетевые требования не должны вводить расширение номенклатуры используемых типов конструктивно-функциональных модулей (КФМ);
- должна обеспечиваться полная взаимозаменяемость КФМ по форме, установке и функциям;
- топология вычислительной сети БЦВС должна поддерживать различные уровни защиты данных;
- топология вычислительной сети БЦВС должна иметь возможность изменения конфигурации с целью реализации свойства отказоустойчивости системы.

В известных сегодня реализациях отечественных бортовых комплексов – «БВС-1» [5], многопроцессорный вычислительный комплекс (МПВК) [6] (ЗАО НПП «Авиационная и морская электроника»), «Базис 5.0» [7] (ОАО «Научно-конструкторское бюро вычислительных систем») – используются различные сетевые топологии: «линия», «двойная звезда», «общая шина».

Топология типа «линия» не отвечает требованиям к надежности вычислительной системы. При топологии типа «двойная звезда» выход из строя одного из модулей коммутаторов повлечет за собой неисправность сегмента сети или, возможно, сети в целом. При использовании топологии типа «общая

шина» узким местом системы является сам элемент общей шины, при неисправности которого отказывает БЦВС. Кроме того, при такой топологии невелика пропускная способность внутреннего канала обмена, особенно при большом количестве абонентов. В связи с этим одной из актуальных задач современного авиационного приборостроения является разработка перспективной сетевой организации БЦВС, ориентированной на достигнутый уровень знаний в области системотехники и на имеющуюся в наличии у разработчиков номенклатуру элементной базы.

Целью настоящей работы является анализ существующих решений организации сетевой топологии БЦВС перспективных летательных аппаратов и описание предлагаемой авторами новой сетевой топологии, отвечающей современным требованиям концепции интегрированной модульной авионики и улучшающей количественные показатели бортового оборудования.

Анализ существующих технических решений при построении многомашинных вычислительных комплексов

Среди множества возможных конфигураций различают [8] полносвязные (когда каждый из абонентов сети непосредственно связан со всеми остальными абонентами) и неполносвязные сети. Среди неполносвязных конфигураций различают ячеистую топологию, кольцевую топологию, звездообразную топологию и конфигурацию «общая шина».

Согласно технической документации, МПВК [6] предназначен для многоканальной цифровой обработки больших потоков информации в реальном масштабе времени и может быть использован как в качестве автономной бортовой вычислительной системы, так и для построения кластерных суперЭВМ. В состав МПВК входят:

- до 7–8 модулей цифровых процессорных сигналов (МЦПС), представляющих собой двухпроцессорную систему (один процессор установлен на основной плате, второй – на дополнительном мезонинном модуле);
- модуль центрального процессора (МЦП);
- объединительная кросс-плата межмодульных соединений;
- модуль блока питания.

Для организации внутрисистемного взаимодействия используются стандартный интерфейс – системная шина CompactPCI (PICMG 2.0 D3.0), а также специализированные интерфейсы. Уровень внутрисистемного взаимодействия представлен:

- системным уровнем, который обеспечивает организацию информационного взаимодействия сигналов МЦПС с МЦП по стандартному магистрально-шинному интерфейсу CompactPCI;
- уровнем информационного взаимодействия МЦПС, который обеспечивает высокоскоростной обмен данными между модулями МЦПС по специализированному интерфейсу;
- уровнем межпроцессорного взаимодействия, который обеспечивает обмен данными между основным и мезонинным процессорами в модуле МЦПС.

На рис. 1 изображена внутренняя структура МПВК с внутренними связями. Топология внутренней сети состоит из топологии типа «линия» при соединении контроллеров специализированного интерфейса модулей МЦПС и топологии типа «общая шина», по которой соединяются все контроллеры CompactPCI модулей МЦПС и модуля МЦП.

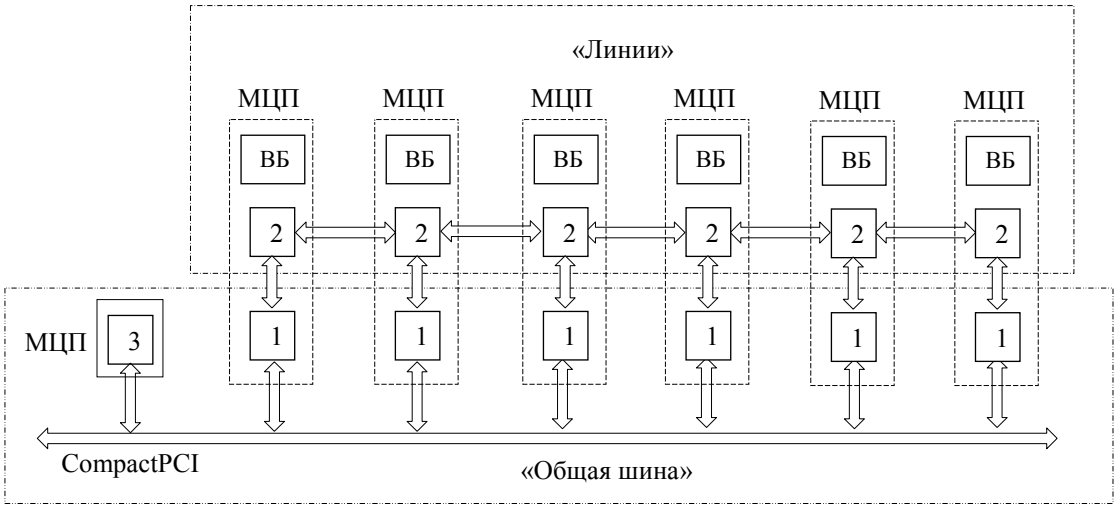


Рис. 1. Сетевая топология МПВК: 1 – контроллер CompactPCI МЦПС; 2 – контроллер специализированного интерфейса МЦПС; 3 – контроллер CompactPCI МЦП; ВБ – вычислительный блок

Проект «Базис 5.0» [7] предназначен для применения в качестве унифицированных базовых аппаратно-программных средств в комплексах бортового оборудования перспективных самолетов разных типов. «Базис 5.0» состоит из модуля универсального процессора данных (МУПД), модуля унифицированного носителя мезонинов (МНМ), модуля сетевого коммутатора AFDX (МСК), модуля вторичных источников электропитания (МВЭ), модуля сопряжения МУПД (МС МУПД), модуля оптических интерфейсов ARINC818 (МОИ А818), модуля сопряжения универсального (МСУ) и модуля сопряжения МВЭ (МС МВЭ). Все модули соединены быстродействующей распределенной коммутационной средой PCI-Express.

Сетевая топология комплекса «Базис 5.0» представлена на рис. 2. Топология соответствует стандартной сетевой топологии типа «общая шина».

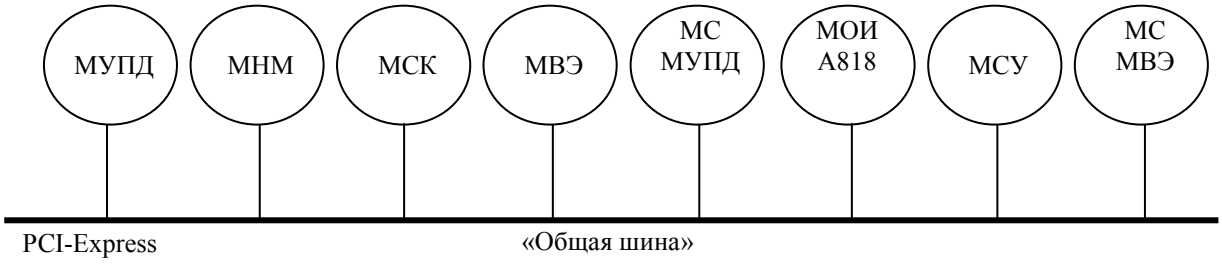
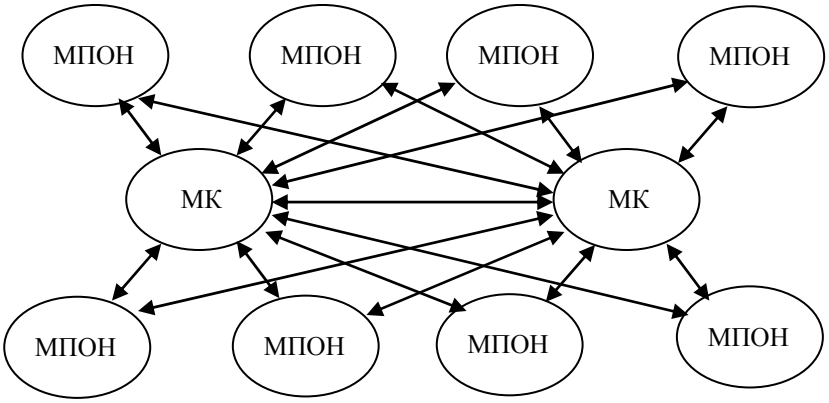


Рис. 2. Сетевая топология комплекса «Базис 5.0»

Бортовая вычислительная система (БВС-1) [5] предназначена для выполнения вычислительных и управляющих функций в составе информационно-управляющих систем перспективных комплексов бортового оборудования военной и гражданской авиации. БВС-1 обеспечивает резервированную полнодуплексную связь на основе последовательного высокоскоростного интерфейса коммутируемой архитектуры между установленными в нее интеллектуальными электронными модулям, а также связь с другими системами бортового оборудования. БВС-1 состоит из модулей процессора общего назначения (МПОН) и модуля коммутатора (МК). Архитектура системы – симметричная многопроцессорная с дублированной средой коммутации каналов стандарта ARINC664. Топология внутренней сети системы БВС-1 изображена на рис. 3 и является топологией типа «двойная звезда».



«Двойная звезда»

Рис. 3. Сетевая топология системы БВС-1

Архитектура БЦВС на основе интерфейса SpaceWire

Одним из путей практической реализации перспективных БЦВС является путь построения вычислительных систем с применением технологии коммутируемых высокоскоростных интерфейсов SpaceWire в качестве внутрисистемного интерфейса, а также в качестве внешнего интерфейса для подключения сетевых абонентов в составе летательного аппарата.

Результатом практической реализации применения интерфейсов SpaceWire для построения бортовой цифровой вычислительной системы является структура БЦВС «Крейт» разработки ФГУП «СПб «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», приведенная на рис. 4 [6, 9–12]. БЦВС построена на основе унифицированных КФМ. В качестве КФМ выступают разные по назначению модули:

– вычислительные модули, производящие сложные расчеты для управления полетом летательного аппарата;

– модули ввода–вывода, обеспечивающие функции обмена информацией по последовательным каналам, мультиплексным каналам обмена, разовым командам;
– графические модули, обрабатывающие изображение для его вывода на средства бортовой индикации;
– модули постоянной памяти, предназначенные для хранения функционального программного обеспечения;
– модули электропитания, обеспечивающие преобразования напряжения бортовой резервированной сети во вторичные напряжения, необходимые для электропитания модулей. Структурная схема БЦВС подробно рассмотрена в работе [1].

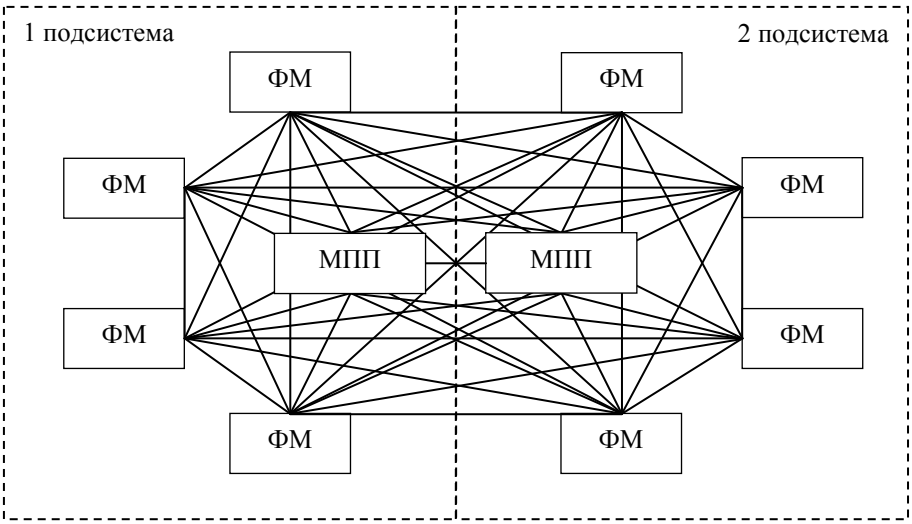


Рис. 4. Комбинационная схема сетевой топологии БЦВС «Крейт»: МПП – модуль постоянной памяти; ФМ – функциональный модуль

В основу архитектуры БЦВС положены составляющие сетевой топологии коммутации модулей по схеме типа «двойная звезда» и «полносвязная сеть».

Сетевая топология системы «Крейт», представленная на рис. 4, является смешанной топологией. С одной стороны, это полносвязная сеть, так как все модули соединены между собой, но также тут присутствуют схемные решения топологии типа «двойная звезда», так как все КФМ соединены с двумя модулями МПП, которые обеспечивают работу комплекса в целом (распределяют задачи, контролируют состояние исправности компонентов и т.п.). Соединяя в себе достоинства обоих сетевых решений, система «Крейт»:

– повышает надежность работы комплекса, позволяя не только реализовать скользящее резервирование компонентов, но и перераспределять пути трафика данных при выходе из строя соединительных связей;
– достигает максимальной пропускной способности благодаря подключению всех абонентов сети по типу «точка–точка» через неблокирующий коммутатор;
– обеспечивает программно управляемое исполнение функциональных задач авионики, позволяя реализовывать различные вычислительные структуры в одной конструкции. Это может быть организация распределенных вычислений или, например, организация мажорирования данных, причем изменение функций каждого из модулей возможно непосредственно во время полета.

Сравнение показателей надежности для различных вариантов назначения функциональных задач на вычислительные ресурсы

Архитектура системы «Крейт» обеспечивает несколько вариантов назначения функциональных задач на имеющиеся в системе вычислительные ресурсы:

– каждая из задач исполняется на собственном вычислительном устройстве;
– все задачи исполняются на одном вычислительном устройстве;
– часть задач исполняется на индивидуальных вычислительных устройствах, остальные задачи исполняются на одном вычислительном устройстве, имеющемся в системе.

Используя разные правила назначения, появляется возможность за счет организации логических протоколов взаимодействия между модулями повысить надежность или увеличить количество решаемых задач. Сравним несколько вариантов решения задачи о назначении.

Первый вариант – для решения необходимого объема функций в полете достаточно 4 вычислительных модулей, еще 4 вычислительных модуля (из имеющихся 8) можно использовать в ка-

честве резервной цепи для горячего резервирования (общее резервирование). Эквивалентная схема надежности для этого случая представлена на рис. 5.

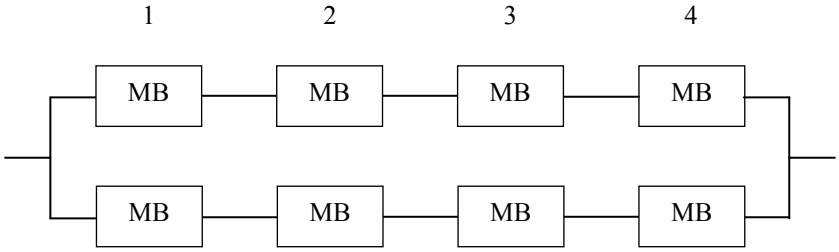


Рис. 5. Схема надежности вычислительной системы для варианта с резервированием в виде дублирования последовательных групп из 4 вычислительных модулей (МВ – модуль вычислительный)

Вероятность безотказной работы одного модуля $P(t)$ определяется по формуле

$$P(t) = \mathrm{e}^{-\lambda t}, \tag{1}$$

где λ – интенсивность отказов; t – время полета; $\lambda = 50 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$; $t = 25$ ч. Подставив исходные данные в (1), получим вероятность безотказной работы одного модуля $P(t) = 0{,}99875$. Тогда вероятность отказа одного модуля $Q(t)$ определяется по формуле $Q(t) = 1 - P(t) = 0{,}00124$.

Вероятность отказа системы по схеме рис. 5 будет определяться по формуле

$$Q_{\text{сист}}(t) = \frac{1}{(m+1)!}[1-(1-Q_i)^{n_0}]^{m+1}, \tag{2}$$

где m – количество резервных цепочек ($m = 1$), n_0 – количество модулей в цепочке ($n_0 = 4$). Подставив исходные данные в (2), получим $Q_{\text{сист}}(t) = 0{,}00001225$. Таким образом, средняя наработка на отказ системы для времени полета $t = 25$ ч составит:

$$T = \frac{t}{Q_{\text{сист}}(t)} = \frac{25}{0{,}00001225} = 2 \cdot 10^6 \text{ ч}.$$

Второй вариант – для решения необходимого объема функций в полете также достаточно 4 вычислительных модуля, но в системе реализована сетевая топология типа «полносвязная сеть». В таком случае каждый из 4 резервных модулей может заменить любой из основных (скользящее резервирование), не накладывая никаких ограничений на производительность БЦВС в целом. Эквивалентная схема надежности для такого случая представлена на рис. 6.

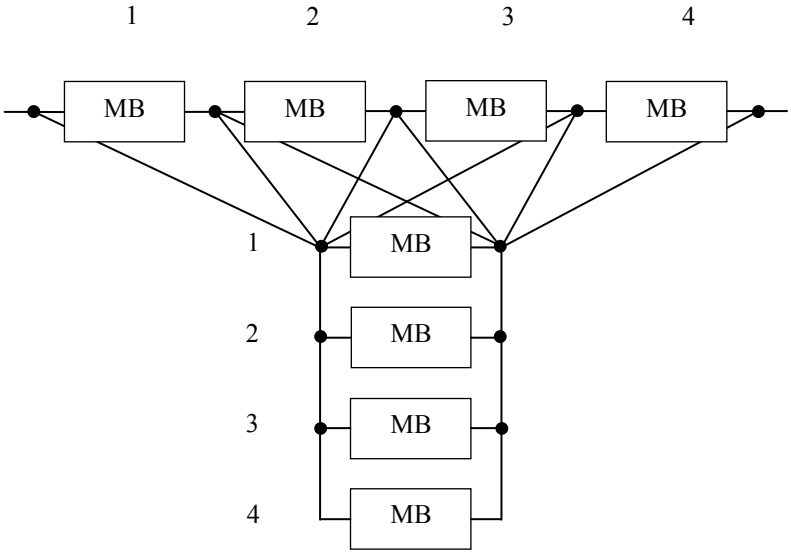


Рис. 6. Схема надежности вычислительной системы для случая с реализацией скользящего резервирования (МВ – модуль вычислительный)

Приближенное выражение для вероятности отказа за время t имеет вид $Q_{\text{сист}}(t) = \mathrm{C}_{n_0+m}^{m+1} Q_i^{m+1}$, где n_0 – количество модулей в основной цепочке; m – количество модулей в резервной цепочке; Q_i – вероятность отказа одного модуля; $\mathrm{C}_{n_0+m}^{m+1}$ – обозначение для числа сочетаний. Таким образом,

$$Q_{\text{сист}}(t) = C_{n_0+m}^{m+1} Q_i^{m+1} = \frac{(n_0+m)!}{(m+1)!(n_0-1)!} Q_i^{m+1} = C_8^5 Q_i^5 = 56 Q_i^5 .$$

Для тех же исходных значений (Q_i = 0,00124) имеем $Q_{\text{сист}}(t) = 1,704 \cdot 10^{-13}$, что соответствует средней наработке на отказ группы для времени полета t = 25 ч:

$$T = \frac{t}{Q_{\text{сист}}(t)} = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ ч} .$$

При этом полнота контроля модулей принята равной 1, что соответствует идеализированному случаю, когда любой отказ обнаруживается на 100%.

Заключение

В работе были рассмотрены различные сетевые топологии, используемые при организации архитектуры бортовых авиационных комплексов. Наибольшее распространение среди разработчиков получили топологии типа «двойная звезда» и «общая шина». Однако эти топологии не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к перспективным типам летательных аппаратов. Предложенная авторами топология, основанная на сочетании топологий «полносвязная сеть» и «двойная звезда», использует открытые стандарты на аппаратное и программное обеспечение. В основе построения задействованы конструктивно-функциональные модули с конструктивом 6U по VITA46, VITA48.2, которые являются взаимозаменяемыми по конструкции, месту установки и выполняемым функциям.

Топология сети «Крейт» допускает возможность масштабирования, ограниченную только возможностью коммутатора сети, установленного на каждом модуле, т.е. до 14 модулей в системе. «Полносвязная сеть» обеспечивает высокий уровень взаимной связанности компонентов при соединении по схеме «точка–точка». Предложенная топология не порождает новых типов узкоспециализированных конструктивно-функциональных модулей, исключая необходимость введения модуля-коммутатора. Как было показано в расчетах показателей надежности, предложенная топология предусматривает возможность изменения конфигурации сети в случаях отказа вычислительных узлов с приемлемыми для практики показателями надежности. Таким образом, предложенная топология удовлетворяет принципам организации сети по концепции интегрированной модульной авионики.

Литература

1. Гатчин Ю.А., Жаринов И.О. Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики. – М.: Машиностроение, 2010. – 224 с.
2. Турчак А.А., Чернышев Е.Э. Михайлуца К.Т., Шейнин Ю.Е. Архитектура вычислительных систем для интегрированной модульной авионики перспективных летательных аппаратов // Радиотехника. – 2002. – № 9. – С. 87–95.
3. Горбачев С.В., Рождественский Д.А., Суворова Е.А., Шейнин Ю.Е. Масштабируемые архитектуры распределенных систем на технологии SpaceWire на базе платформы «Мультикор» // Вопросы радиоэлектроники. – 2006. – № 2. – С. 69–80.
4. Парамонов П.П., Жаринов И.О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 1–17.
5. Раменское приборостроительное конструкторское бюро. Бортовая вычислительная станция «БВС-1». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.rpkb.ru, свободный. Яз. рус. (дата обращения 16.04.2013).
6. Севбо В., Орлов А., Лошаков А. Многопроцессорный вычислительный комплекс для задач «жесткого» реального времени // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 3. – С. 32–38.
7. Итенберг И. Интегрированная модульная электроника – новая стратегия на рынке приборостроения // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2010. – № 5. – С. 64–65.
8. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. – 3-е изд. – СПб: Питер, 2007. – 958 с.
9. Книга Е.В., Жаринов И.О., Богданов А.В., Виноградов П.С. Принципы организации архитектуры перспективных бортовых цифровых вычислительных систем в авионике // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (82). – С. 163–165.
10. Книга Е.В., Жаринов И.О. Топология внутренней электрической сети Spacewire для перспективных типов бортовых цифровых вычислительных систем авионики // Сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов научно-педагогической школы кафедры ПБКС «Информационная безопасность, проектирование и технология элементов и узлов компьютерных систем» / Под ред. Ю.А. Гатчина. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – Ч. 1. – С. 122–126.

11. Жаринов О.О., Видин Б.В., Шек-Иовсепянц Р.А. Принципы построения крейта бортовой многопроцессорной вычислительной системы для авионики пятого поколения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4 (68). – С. 21–27.
12. Бондаренко И.Б., Коробейников А.Г., Прохожев Н.Н., Михайличенко О.В. Принятие технических решений с помощью многоагентных систем // NB: Кибернетика и программирование. – 2013. – № 1. – С. 16–20.

Книга Екатерина Викторовна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, ekovinskaya@gmail.com

Жаринов Игорь Олегович – Россия, Санкт-Петербург, ФГУП «Санкт-Петербургское опытно-конструкторское бюро «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», доктор технических наук, доцент, руководитель учебно-научного центра, igor_rabota@pisem.net

УДК 004; 621.39; 681.2

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГРУППЫ ПОЛЕВЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В.М. Денисов, А.В. Радилов

Обоснована актуальность задачи разработки группы полевых геофизических приборов нового поколения. Представлены обобщенные функциональные требования, предъявляемые к этим приборам со стороны отрасли. Описана единая платформа, которая может быть использована для их создания. Показаны преимущества ее использования. Описан опыт разработки полевого радиометра как первого полевого прибора, созданного на принципах единой приборной платформы.

Ключевые слова: геофизические приборы, приборная платформа, полевой радиометр.

Введение

Важнейшим фактором, определяющим возможности развития отечественной экономики и промышленности, являются природные ресурсы страны. Состояние минерально-сырьевого комплекса и его технико-технологическое обеспечение в значительной степени определяют экономическую безопасность России. В современных условиях к технико-технологическому обеспечению геологоразведочных работ предъявляются особые требования, обусловленные исчерпанием фонда приповерхностных, сравнительно легко открываемых месторождений, а также тем, что появились факторы, усложнившие геоморфологическую обстановку проведения поисковых работ – большой интервал глубин, арктические широты, горные районы с отсутствующей инфраструктурой, шельф северных морей и др.

Вместе с тем, общий ход научного и технического развития привел к качественному изменению ситуации. С одной стороны, появились новые геологические идеи, основанные на связи размещения полезных ископаемых с глубинными процессами, происходящими в земной коре и в мантии. С другой стороны, развитие информационно-компьютерных технологий, микроэлектроники, средств спутниковой навигации, появление беспроводных каналов связи позволяет создать инструментальные средства для реализации новых геологических идей. Как следствие, качественно новой основой для изучения земных недр становится инструментальная геология. Наряду с этим хорошо известно, что современная приборная база отечественных геологических организаций и уровень их геолого-геофизических технологий значительно отстают от развитых зарубежных стран.

К настоящему времени в секторе приборного обеспечения геологической отрасли Российской Федерации (РФ) сложилась следующая ситуация. Имеющийся парк приборов устарел физически и морально. В отрасли продолжается эксплуатация приборов, основная часть которых разработана в 60–90-х годах прошлого века. Одновременно с этим в стране уменьшаются разведанные запасы минеральных ресурсов. Освободившиеся ниши в технико-технологическом обеспечении активно осваиваются зарубежными компаниями. Более 90% сейсмических партий, выполняющих работы на территории России, оснащены импортной техникой (продукция фирм Франции и США). Объем гравиметрических работ, выполняемых с использованием канадских гравиметров, составляет более 70% от общего объема этих работ. Более 80% глубинных электромагнитных зондирований выполняется с использованием аппаратуры компании Phoenix Geophysics (Канада). Этот перечень можно продолжать.

Сегодня в РФ начали действовать государственные программы по воспроизводству природных ресурсов. Однако без системного восстановления приборного обеспечения отрасли эти программы не могут быть выполнены в поставленные сроки [1–3].

Таким образом, актуальность задачи удовлетворения спроса на современные полевые геофизические приборы и восстановления процесса непрерывного инструментального обеспечения геологической

отрасли не вызывает сомнения. Для решения столь масштабной задачи необходимо осуществить разработку группы полевых приборов и обеспечить их серийное производство.

В работе представлены результаты исследования принципов функциональной организации не отдельного прибора, а группы геофизических приборов различного назначения. Разработаны принципы системной интеграции ряда современных технологий в рамках общей архитектуры, на основе которых разработан опытный образец полевого радиометра, входящего в данную группу приборов.

Функциональные требования к современным приборам полевой геологии

В рамках настоящей работы рассмотрены системные вопросы разработки геофизических приборов нового поколения, предназначенных для ведения радиометрической разведки, магнитометрической разведки, электроразведки, сейсморазведки. В состав группы этих приборов входят полевые радиометры и спектрометры, магнитометры и магнитометры–градиентометры, приборы для проведения магнитотеллурического зондирования, приборы электро- и сейсморазведки и ряд других приборов.

Достижения в области современного приборостроения позволяют решить задачу регулярного инструментального обеспечения геологической отрасли на качественно новом уровне. При этом речь должна идти не о воссоздании хорошо известных технических решений на новой элементной базе. Необходимо исходить из того, что современные технологии предоставляют уникальную возможность разработать и передать в отечественную геологию группу полевых геофизических приборов с принципиально новыми функциональными возможностями. Фактически это означает возможность одним шагом перейти из пространства технических решений прошлого в современное приборное пространство, минуя этап медленных эволюционных преобразований (рис. 1).

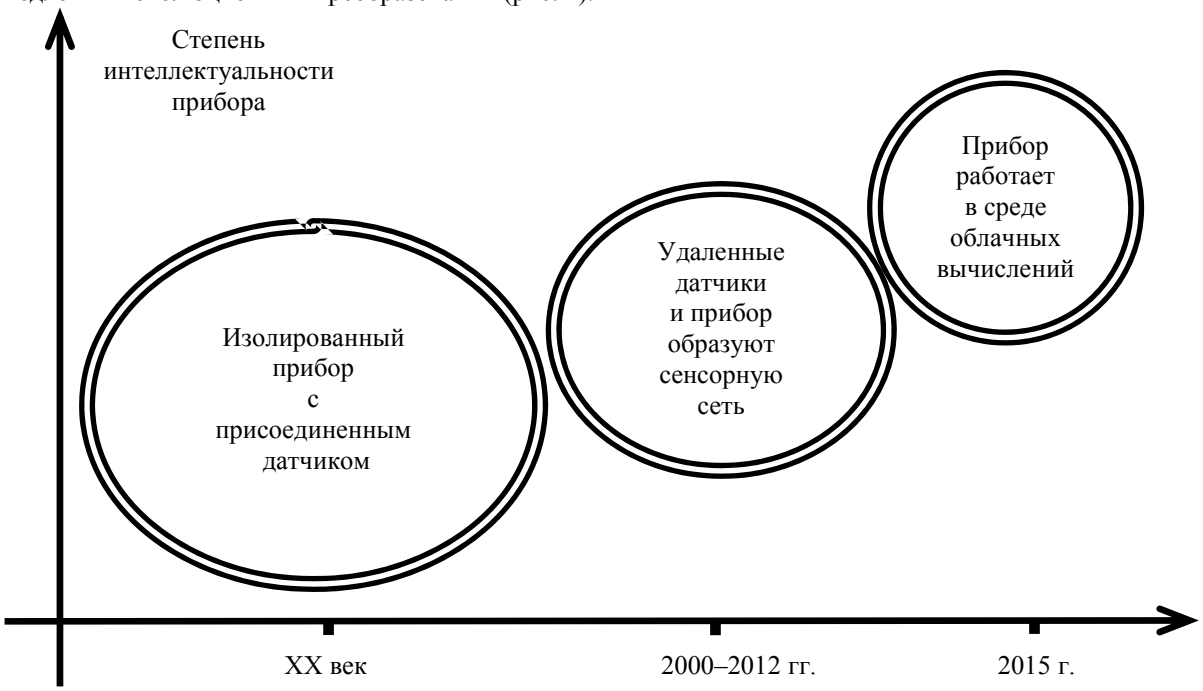


Рис. 1. Смена поколений полевых геофизических приборов

Со времени создания предыдущего поколения приборов принципиальным образом изменилась технологическая база приборостроения. Это дает возможность широкого применения беспроводных каналов связи, Интернета и облачных вычислений, спутниковой навигации. Полевые приборы могут использовать мощные специализированные вычислители с расширяемым программным обеспечением (ПО). Технологии речевого управления уже сегодня являются реальной альтернативой традиционным способам управления режимами с помощью кнопок и клавиш.

Появление на рынке геофизических приборов с подобным набором функций позволяет изменить традиционное представление об организации полевых работ. В первую очередь это связано с возможностью увеличения объемов проводимых работ, расширением возможностей обработки данных непосредственно в полевых условиях.

Анализ запросов, предъявляемых со стороны профессионального сообщества, позволил сформировать единый набор требований к функциональным возможностям современных геофизических приборов.

1. Режимы измерения:

– интерактивный режим измерений в ходе пешеходной съемки;

– автономный режим измерений при стационарном развертывании прибора в полевых условиях, временной интервал накопления информации от минут до нескольких суток.

В общем случае пешеходные приборы могут использоваться в стационарном состоянии, а многоканальные полевые приемники–регистраторы – в режиме движения.

2. **Многоканальный прием информации (мультисенсорный режим измерений)**:
   – приборы, предназначенные для пешеходной съемки, используют один–два параллельных измерительных канала, дополнительными информационными каналами могут служить канал спутниковой навигации, каналы аудио- и видеоинформации и др;
   – полевые приемники–регистраторы используют многоканальный прием информации, поступающей от группы однородных датчиков.
3. **Предварительная обработка. В**ыделение слабых аналоговых входных сигналов на фоне шумов с использованием фильтрующих процедур, а также 24- и 32-разрядного аналого-цифрового преобразования (АЦП).
4. **Математическая обработка информации. С**ложность математической обработки информации в полевых условиях должна приближаться к возможностям обработки в условиях стационарной лаборатории. Пакет прикладных программ обработки должен иметь способность к наращиванию.
5. **Каналы вывода информации. Н**акопленная информация должна сохраняться в памяти прибора и (или) передаваться для хранения и обработки во внешние, в том числе удаленные центры обработки.
6. **Использование беспроводных каналов связи:**
   – между датчиками;
   – между датчиками и собственным (приборным) центром обработки;
   – между собственным и внешним центрами обработки.
7. **Облачные вычисления**. При проведении математической обработки повышенной сложности необходимо обеспечить возможность использования ресурсов среды облачных вычислений: корпоративные и (или) коммерческие облака должны применяться для обработки и хранения полевых данных.
8. **Подключение к мировому телекоммуникационному пространству** должно обеспечивать возможности**:**
   – передачи результатов измерений во внешний центр обработки;
   – доступа в среду облачных вычислений;
   – удаленного контроля состояния прибора.
9. **Измерение мирового времени** должно обеспечивать высокую точность синхронизации датчиков (сети сенсоров) и центра обработки.
10. **Определение географических координат** должно сопровождать процесс измерения физических полей с целью автоматической привязки данных к координатной сетке.
11. **Использование интерактивного режима с речевым управлением** обеспечивает возможность оперативного управления прибором с использованием голосовых команд.
12. **Дополнительные каналы информации** служат для ввода аудио- и видеоданных, которые синхронизируются с массивами результатов измерения физических полей.
13. **Автономное питание**:
   – для пешеходных приборов – до 10 часов;
   – для стационарно установленных приборов запас мощности должен обеспечивать непрерывную работу в течение всего штатного цикла измерений.
14. **Массо-габаритные ограничения.** Приборы, предназначенные для ведения пешеходной съемки, должны удовлетворять современным эргономическим требованиям.
15. **Климатические условия эксплуатации**:
   – для пешеходных приборов – температура от –20°С до +40°С;
   – для стационарно установленных: приборов – от –40°С до +70°С;.
   – повышенная влажность (степень защиты IP66, IP67).
16. **Контроль состояния**. Прибор должен обеспечивать возможность автоматической самодиагностики.

Рассмотрим в качестве примера схему полевого спектрометра, предназначенного для измерения спектров излучения естественных радионуклидов K, U, Th (калий, уран, торий) с целью расчета их концентрации (рис. 2).

Специализированный полевой вычислитель (приборный центр обработки) получает информацию от датчика гамма-излучения спектрометра по беспроводному каналу связи. При этом расстояние между вычислителем и датчиком может составлять несколько десятков метров. Приемник GPS/Glonass-навигации встроен в общий корпус вычислителя (как вариант – встроен в корпус измерительного датчика [4]).

Канал ввода аудиоинформации позволяет наложить речевой комментарий оператора с описанием места проведения измерений. Тот же канал используется для речевого управления прибором.

Вычислитель производит обработку полученных сигналов, автоматически распознавая соответствующие линии в спектре и вычисляя значения концентрации радионуклидов. Результат распознавания отображается на экране прибора. При необходимости оператор может переслать полученный спектр для обработки в один из облачных ресурсов и (или) в собственную корпоративную сеть для обработки и хранения. После завершения обработки ее результат будет передан обратно на приемник полевого прибора.

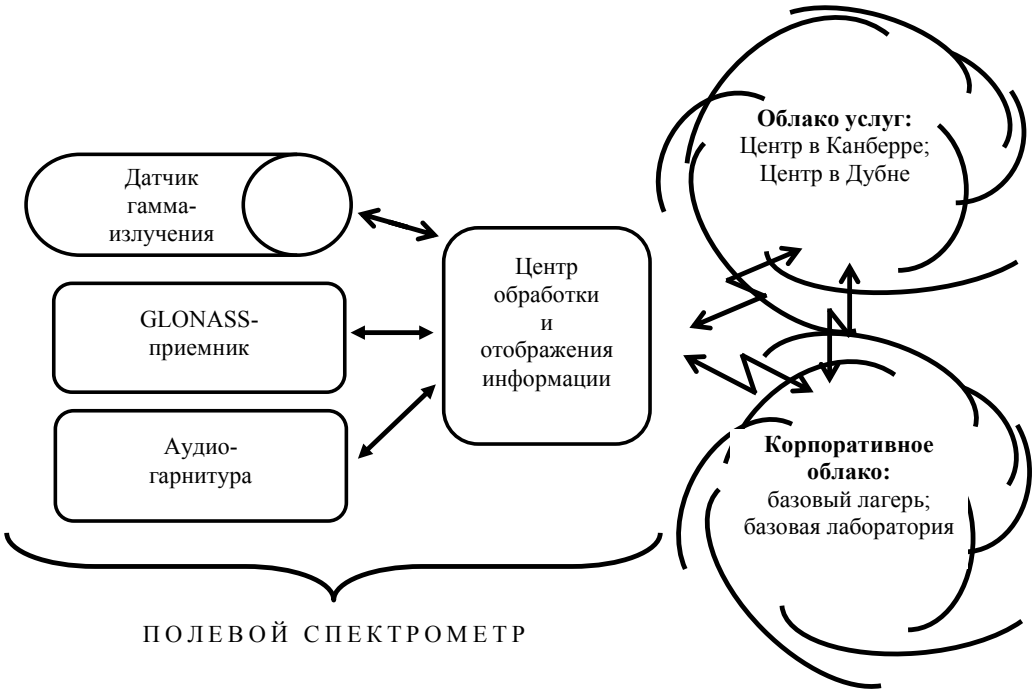


Рис. 2. Пример измерения и обработки в полевых условиях спектров излучения естественных радионуклидов K, U, Th

Единая платформа полевых геофизических приборов

Базовый принцип, использованный при создании настоящей концепции, состоит в требовании выполнить разработку группы полевых геофизических приборов на единой технологической платформе. Идентичность основных функциональных требований, предъявляемых к различным типам геофизических приборов, позволяет уверенно говорить о возможности создания такой платформы, что, в конечном счете, позволит начать их конвейерную разработку.

Сегодня каждое предприятие–разработчик специализируется на создании лишь одного, реже – двух типов приборов. Использование единой платформы позволит в рамках одной производственной кооперации разрабатывать и выпускать приборы разного назначения. При этом значительно снижается себестоимость разработок, потребитель получает приборы разного назначения, но совместимые по интерфейсу, с однородными эргономическими характеристиками, с идентичным сервисным обслуживанием.

Под платформой приборов будем понимать совокупность аппаратных, программных и аппаратно-программных модулей, позволяющих создавать конкретные приборные приложения в рамках единой группы геофизических приборов.

Платформа группы полевых приборов представляет собой систему программно-аппаратных средств, включающую в себя:

- набор подсистем (модулей), общих для всех полевых приборов разного назначения и образующих ядро архитектуры;
- конечный расширяемый набор специализированных подсистем (модулей);
- технологию интегрирования общих и специализированных подсистем платформы в соответствии с требованиями прикладной задачи.

Процесс интеграции специализированных подсистем и подсистем общего ядра обеспечивает технологию создания конкретной приборной реализации. Фактически речь идет о технологии превращения платформы в конкретный полевой прибор, такой как, например, радиометр, магнитометр или многоканальный приемник сейсмических сигналов.

Представленная таблица фактически отображает процесс создания нового прибора:

- выбор соответствующего датчика;
- разработка специализированных подсистем;
- интеграция на базе общего ядра платформы.

Прибор	Специализированные подсистемы				Подсистемы общего ядра платформы
	Тип датчика	ПО датчиков	Прикладное ПО	Конструктивные особенности	
Радиометр пешеходный	сцинтилляционный детектор	+	+	+	– типовой входной канал с контроллером предобработки и АЦП, варианты 24 и 32 разрядов; – устройство мультипликации входных каналов; – центральный процессор; – флэш–память; – приемо-передающие модули беспроводной передачи информации; – GSM, 3G-модуль; – GPS / GLONASS-модуль; – модуль индикации и управления; – система каналов ввода–вывода; – микрофон, динамики, видеокамера; – модуль речевого управления; – модуль автономного питания (батарейное, аккумуляторное); – программное обеспечение общего назначения
Спектрометр пешеходный	сцинтилляционный детектор	+	+	+	
Магнитометр пешеходный	Датчик Оверхаузера	+	+	+	
Магнитометр-градиентометр	Датчик Оверхаузера	+	+	+	
Полевой приемник электромагнитных полей	Индукционные датчики электромагнитного поля	+	+	+	
Полевой приемник геоэлектрических данных	Дипольные приемники	+	+	+	
Полевой приемник сейсмических данных	Сейсмоприемники разных типов	+	+	+	

Таблица. Платформа полевых геофизических приборов

Опыт создания полевого радиометра как первого прибора из группы полевых геофизических приборов нового поколения

Полевой радиометр стал прибором, на котором проводилась опытная отработка базовых принципов единой приборной платформы (рис. 3). В приборе реализовано большинство требований, предъявляемых со стороны общей платформы полевых приборов (функции сетевой обработки и речевого управления будут реализованы в следующей модификации радиометра) [5].

Прибор предназначен, главным образом, для радиометрического обследования местности и горных выработок (измерение уровня гамма-излучения в условиях пешеходной съемки). Новизной данного прибора, существенно расширяющей его возможности, является способность измерять спектр излучения радионуклидов.

В зависимости от поставленных задач съемка может проводиться в нескольких режимах.

Режим регулярного обследования территории – это основной режим, предназначенный для радиометрического обследования территории и поиска аномалий. Ведется непрерывное измерение уровня радиационного фона. Одновременно производится определение и запись координат маршрута пользователя. При необходимости можно вести непрерывную запись уровня гамма-фона по всему маршруту следования. В итоговый протокол включаются все измеренные значения вместе с координатами и временем измерения, а также статистические данные о фоне гамма-излучения на обследуемой территории в соответствии с требованиями нормативных документов.

Режим измерения общего (интегрального) фона в точке используется при измерении уровня радиационного фона в предварительно заданных точках или в точках найденных аномальных зон. В этом режиме производится одноразовое измерение уровня фона с увеличенным временем усреднения (5–10 с).

Результаты измерений вместе с координатами точки, временем измерения записываются в память радиометра. В этом же режиме предусмотрена запись аудиокомментариев. Режим ориентирован на прохождение профилей, результаты данных измерений по каждому профилю объединяются в общем файле.

Режим уточнения состава излучения в точке служит для оценки физической природы аномалии. В этом режиме производится измерение спектра излучения и определяется тип источника излучения, включая как естественные излучатели – уран, торий, калий, так и искусственные – цезий, кобальт и др. Время накопления информации в точке составляет 5–10 мин. Полученные спектры вместе с координатами точки, временем измерения и аудиокомментариями записываются в память. Одновременно на экране отображается значение интегрального фона.

а б

Рис. 3. Полевой радиометр: внешний вид (а); вид на главную панель (б)

К основным конструктивным особенностям прибора можно отнести:

- встроенный GPS/ГЛОНАСС-приемник, обеспечивающий точность определения координат места точки измерения (среднеквадратическое отклонение) не хуже 5 м;
- беспроводный интерфейс, с помощью которого осуществляется беспроводной обмен между блоком регистрации и отображения и блоком детектирования;
- мощный внутренний контроллер, позволяющий выполнять обработку данных в полевых условиях;
- 1024-канальный АЦП и карта памяти на 2 Гб, общий объем памяти позволяет хранить результаты двух–трех недель работы с радиометром;
- жидкокристаллический дисплей размером 3.7’’ с разрешением 320×240 пикселей.

Питание осуществляется от батарей или аккумуляторов типа R-14. Длительность непрерывной работы — не менее 8 часов. Примененные конструктивные решения позволили обеспечить устойчивую регистрацию гамма-квантов в диапазоне энергий 20–3000 кэВ.

Допускаемая основная погрешность не превышает 10%. Количество каналов определения спектра излучения – 1024. Нелинейность характеристик не более 1%. Радиометр предназначен для работы в диапазоне температур от –20ºС до +50ºС.

На рис. 4, 5 представлены примеры измеренных спектров излучения.

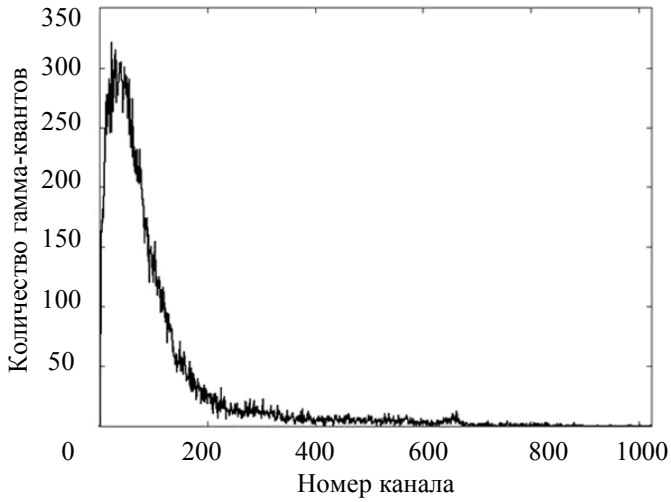


Рис. 4. Естественный фон в пределах городской черты. Время накопления – 5 мин. Линия калия (642-й канал)

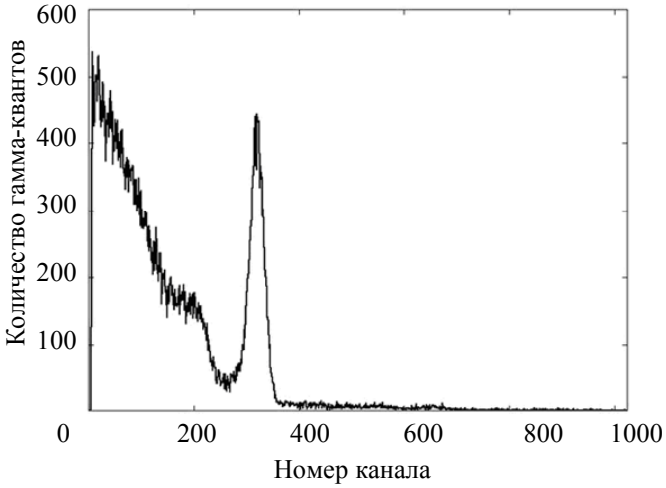


Рис. 5. Естественный фон в сочетании с излучением Цезий-137
(точечный эталонный источник, активность в источнике 7 кБк)

Заключение

Настоящая работа посвящена вопросам восстановления регулярного приборного обеспечения отечественной геологоразведки. Речь идет о том, чтобы запустить процесс разработки современных полевых приборов, в которых интегрированы новейшие технические достижения, включая сетевые и мобильные технологии, спутниковую навигацию, беспроводные каналы, мощные специализированные вычислители, способные работать в полевых условиях.

Сформулированы общие функциональные требования к приборам. Выявленная при этом идентичность требований позволила сделать вывод о возможности разработки полевых геофизических приборов на общей платформе. При этом пользователь получает в руки универсальный инструмент для решения задач полевой геофизики с единым интерфейсом, однородным набором функциональных возможностей, расширяемым программным обеспечением, единым сервисом. Использование общей платформы позволяет также снизить себестоимость и сроки разработок.

Основные выводы были проверены и подтверждены в ходе разработки опытного образца полевого радиометра, который стал первым прибором, разработанным на базе единой платформы.

Общие принципы единой приборной платформы могут быть использованы при создании измерительных устройств, применяемых также и в других отраслях [6–8]. В первую очередь речь идет о задачах, решение которых требует:

- применения подвижных или стационарно установленных датчиков различных типов, передающих информацию по беспроводным каналам связи;
- использования каналов Интернета, в том числе для выполнения облачных вычислений;
- применения автономных режимов работы в удалении от источников сетевого питания;
- использования сложной математической обработки данных.

Литература

1. Стратегия развития геологической отрасли Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 июня 2010 г. № 1039-р. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2072179/, свободный. Яз. рус. (дата обращения 14.10.2013).
2. Государственная программа Российской Федерации «Воспроизводство и использование природных ресурсов» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=130606&print=Y, свободный. Яз. рус. (дата обращения 14.10.2013).
3. Орлов В.П. По материалам докладов на парламентских слушаниях в Совете Федерации ФС РФ Реалии и проблемы отечественной геологоразведки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vipstd.ru/gim/content/view/645/279/, свободный. Яз. рус. (дата обращения 14.10.2013).
4. Денисов В.М., Радилов А.В., Зайцев Д.Б. Полевой спектрометр гамма излучения. Патент на полезную модель RU 129268 U1.
5. Денисов В.М., Радилов А.В. Флагман Гамма – новый пешеходный радиометр для измерения уровня и спектрального состава гамма-излучения // Геофизический вестник. – 2012. – № 11–12. – С. 9–13.

6. Марусина М.Я., Суворов Н.Б., Козаченко А.В., Толкович Д.В. Синхронизация физиологических сигналов интеллектуальной деятельности человека с помощью многофункционального измерительного комплекса // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 4 (86). – С. 49–56.
7. Арсеньев А.В., Волченко А.Н., Лихачева Л.В., Печерский В.И. Применение метода ВЧ-ближнепольного зондирования в диагностике биообъектов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2 (72). – С. 154–157.
8. Коробейников А.Г., Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С. Интеллектуальные информационные системы магнитных измерений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (71). – С. 39–45.

Денисов Виктор Маевич – Россия, Санкт-Петербург, ЗАО «Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации», доктор технических наук, заместитель генерального директора, 070255@gmail.com

Радилов Андрей Владимирович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, ведущий программист, andrad@mail.ru

УДК 004.75, 004.62, 004.942

АГЕНТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПРЕДПРИЯТИЯ С АДАПТАЦИЕЙ МЕХАНИЗМОВ РАБОТЫ И ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

А.В. Владимиров

Изложена проблема функционирования крупных информационных систем, обрабатывающих большие объемы разнородной информации на предприятии. Разработана структура адаптивной информационной системы с выделением основных сегментов: административный и сервис-агентный, сегмент оперирования с данными, интеллектуальный сегмент. Приведены функции компонентов системы. Разработана структура агентной составляющей адаптивной информационной системы. Выделены основные составляющие модели агентного взаимодействия: агент координации, агент адаптации, агент базы знаний, агент базы данных, агент пользователя для разработки модели процесса взаимодействия агентов в многоагентной адаптивной информационной системе с использованием аппарата цветных сетей Петри. Рассмотрены основные состояния агентов, используемые в процессе обработки задач. Исследована работа модели на разных этапах, произведен анализ основных свойств системы. Анализ позволил выявить наиболее загруженные составляющие. Проведен сбор статистики использования инструментов пользователями предприятия. На основе полученных статистических данных пользователей разработаны и исследованы процессы адаптации механизмов работы системы, интерфейса. Применение элементов алгоритма позволило сократить время, затрачиваемое работниками предприятия на поиск необходимых элементов, инструментов, упростить процесс взаимодействия пользователей с системой, модифицировать работу системы при высоких нагрузках с копированием исполняющих агентов.

Ключевые слова: многоагентные адаптивные системы, моделирование взаимодействия агентов, цветные сети Петри, агентная архитектура.

Введение

В настоящее время на промышленных предприятиях нужны системы, способные адаптироваться под возникающие требования к их функционированию. В некоторых случаях необходимо производить адаптацию работы системы при минимальном вмешательстве человека или при его отсутствии. Важными проблемами в сфере функционирования крупных адаптивных информационных систем являются проблемы внутреннего взаимодействия компонентов, которые порождаются большими объемами неупорядоченной разнородной информации. Адаптивные информационные системы позволяют динамически учитывать предоставляемые персональные требования пользователей, перераспределять рабочие процессы между компонентами системы, реагировать на возникающие проблемные ситуации, более эффективно использовать ресурсы системы.

На рассматриваемых в процессе исследования предприятиях использовались информационные системы, не позволяющие решать такие проблемы, как объединение больших объемов гетерогенной информации, поиск по распределенным источникам информации, быстрый доступ к распределенной информации, предоставление пользователям набора инструментов, позволяющего быстрее решать поставленные задачи, снизить нагрузку на некоторые элементы, входящие в структуру системы. Применение агентно-ориентированного подхода с использованием элементов адаптации механизмов работы системы и ее интерфейсов позволяет упростить процесс взаимодействия пользователей с системой, сократить затрачиваемое на выполнение задач время, снизить потребление ресурсов системой [1, 2]. Использование многоуровневой архитектуры при построении информационной системы совместно с агентно-ориентированным подходом и элементами адаптации является отличительной особенностью проводимого исследования.

Таким образом, поставленные в настоящей работе задачи исследования адаптации механизмов работы интерфейсов информационных систем являются актуальными как с научной, так и с практической точек зрения.

Описание общей структуры системы

Опишем алгоритм взаимодействия информационной системы с пользователем, а также ее структуру (рис. 1). Выделим три сегмента в системе:

1. административный и сервис-агентный сегмент;
2. интеллектуальный сегмент;
3. сегмент оперирования с данными.

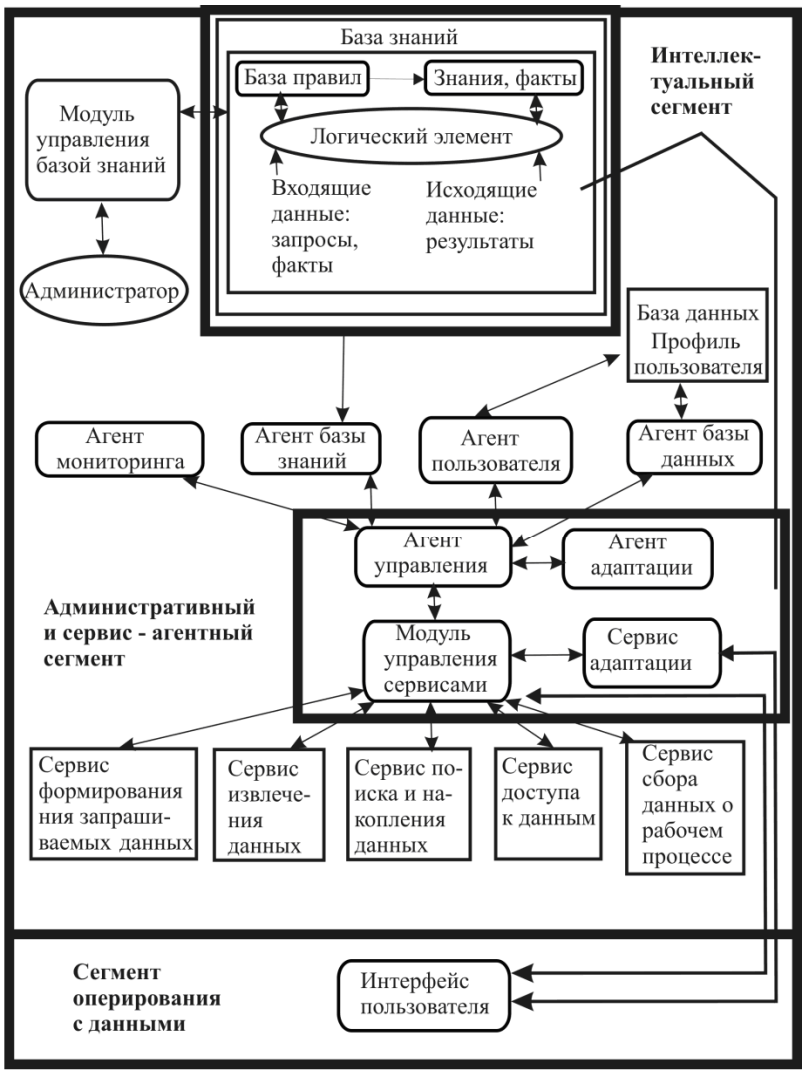


Рис. 1. Структура адаптивной информационной системы

Административный и сервис-агентный сегмент включает в себя инструменты администрирования базы знаний, базу данных, агента мониторинга, агента базы знаний, агента пользователя, агента базы данных, сервис формирования запрашиваемых данных, сервис извлечения данных, сервис поиска и накопления данных, сервис доступа к данным, сервис сбора данных о рабочем процессе. Интеллектуальный сегмент включает в себя базу знаний, агента управления, модуль управления сервисами, сервис адаптации, агента адаптации. Сегмент оперирования с данными включает в себя интерфейс пользователя.

В процессе работы системы от пользователя поступает запрос через интерфейс пользователя с последующим запуском процессов по обработке данных соответствующими сервисами и далее агентами. Поиск решения сервисом или агентом основывается на входных данных и информации, хранящейся в базе знаний. База знаний модифицируется экспертом через модуль управления базой знаний и включает в себя базы правил, факты, информацию, описывающую интерпретацию фактов. Уровень сервисов осуществляет необходимую трансляцию запросов агентов в необходимые действия по работе с распределенными данными. Они выполняет необходимые операции, включающие доступ к back-end ресурсам и

форматирование данных для представления агентам. Логический элемент базы знаний включает основной набор алгоритмов для работы с фактами и правилами, механизмы логического вывода, а также принимает входные факты и запросы, проверяет, соответствуют ли переданные факты хранящейся в базе знаний логической модели предметной области, осуществляет логический вывод, исходя из входящих данных, а также формирует результаты выполнения запроса [3].

Структура агентной составляющей

При рассмотрении структуры адаптивной информационной системы стоит уделить внимание сегменту, содержащему набор разноцелевых агентов, а также моделированию их взаимодействия. Разберем далее более детально агентную составляющую информационной системы, включающую агентов исполнителей – агента мониторинга, агента базы знаний, агента пользователя, агента базы данных, агента адаптации, а также агента управления. Агент управления осуществляет координацию работы подчиненных ему агентов и постановку задач. Агент мониторинга производит слежение за текущим состоянием агентов в системе, количеством поступивших задач. Агент базы данных предназначен для осуществления взаимодействия с базой данных, резервного копирования информации. Агент базы знаний осуществляет передачу входных запросов к базе знаний. Агент пользователя позволяет собирать информацию о действиях пользователей. Агент адаптации собирает данные о функционировании используемых пользователем компонентов системы [3].

Моделирование взаимодействия агентов

Процесс взаимодействия между агентами в многоагентной информационной системе рассмотрим с использованием аппарата цветных сетей Петри [4]. В цветных сетях Петри важное место занимает типизация данных, основанная на использовании множества цветов. Рассмотрим построение агентной составляющей и ее моделирование в среде CPN Tools [5] на следующем примере. На рис. 2 изображена сеть Петри, моделирующая процесс на начальной стадии. В данной ситуации определено множество цветов *tasks* с элементами *tasks_for_knowledgebase_agent, tasks_for_database_agent, tasks_for_adaptation_agent, tasks_for_monitoring_agent, tasks_for_user_agent, task_for_agent_coordination*, обозначающими соответствующие задачи для каждого из имеющихся агентов. Позиция *coordination service* имеет множество цветов *q* с фишкой *coordination_task*, переходящей в позицию *agent coordination*, тем самым инициализируется процесс координации задач агентом управления. Агент координации распределяет задачи в соответствии с указанным типом задачи. Агент мониторинга с использованием счетчиков *Counter* собирает информацию о количестве задач у каждого из агентов с целью выявления степени загруженности определенных агентов. Если текущая задача находится в процессе обработки, то следующая задача добавляется в конец очереди *Queue*. Задачи обслуживаются по принципу «первым пришел – первым обслужен» (FIFO). В случае отсутствия задач в очереди новые поступающие начинают обрабатываться незамедлительно.

В процессе обработки задач агентами (рис. 3) используются следующие состояния: *user agent free* (агент пользователя свободен), *user agent busy* (агент пользователя занят), *user agent use* (агент пользователя используется). Также используются состояние *wait* (ожидание обработки агентом), состояние *timer* 2*c* (таймер на 2 секунды) типа Boolean, которое служит для моделирования задержки, принимая от перехода захвата агента фишку с временным штампом. Фишки, находящиеся при инициализации обработки задачи в позициях, свидетельствующих о том, что агент свободен, в ходе работы сети отражают его состояние (свободен или занят), при этом цвет фишки содержит информацию о задаче, обрабатываемой агентом. После поступления задачи на обработку переход, свидетельствующий о том, что агент захвачен, сработать не сможет, так как нет фишки в позиции, свидетельствующей о том, что агент свободен. Не разрешен также переход, свидетельствующий о том, что агент выполняет обработку из-за того, что фишка, имитирующая таймер, несет временной штамп, равный 2000 мс. Если установлено, что нет доступных переходов, происходит наращивание счетчика глобальных часов до тех пор, пока не «откроется» переход, свидетельствующий о том, что агент выполняет обработку, так как штамп фишки в позиции *timer* 2*c* окажется равен значению глобальных часов. В результате начнется освобождение агентов посредством срабатывания перехода, свидетельствующего о том, что агент выполняет обработку. Таким образом, позиция, свидетельствующая о том, что агент свободен, приобретает фишку со значением *done* (задача выполнена), переход захвата агента активизируется, перемещая следующую фишку на позицию использования агента. Процесс обработки задач прекращается в случае, если не остается фишек в позиции *wait* [6, 7].

На конечной стадии процесса моделирования (рис. 4) определяется общее количество задач, выполненных агентами. Агент координации является наиболее загруженным элементом.

При выполнении процесса моделирования сложных систем на базе аппарата сетей Петри задается определенное количество входных задач и анализируется поведение системы. На основе выходных данных формируются статистические результаты.

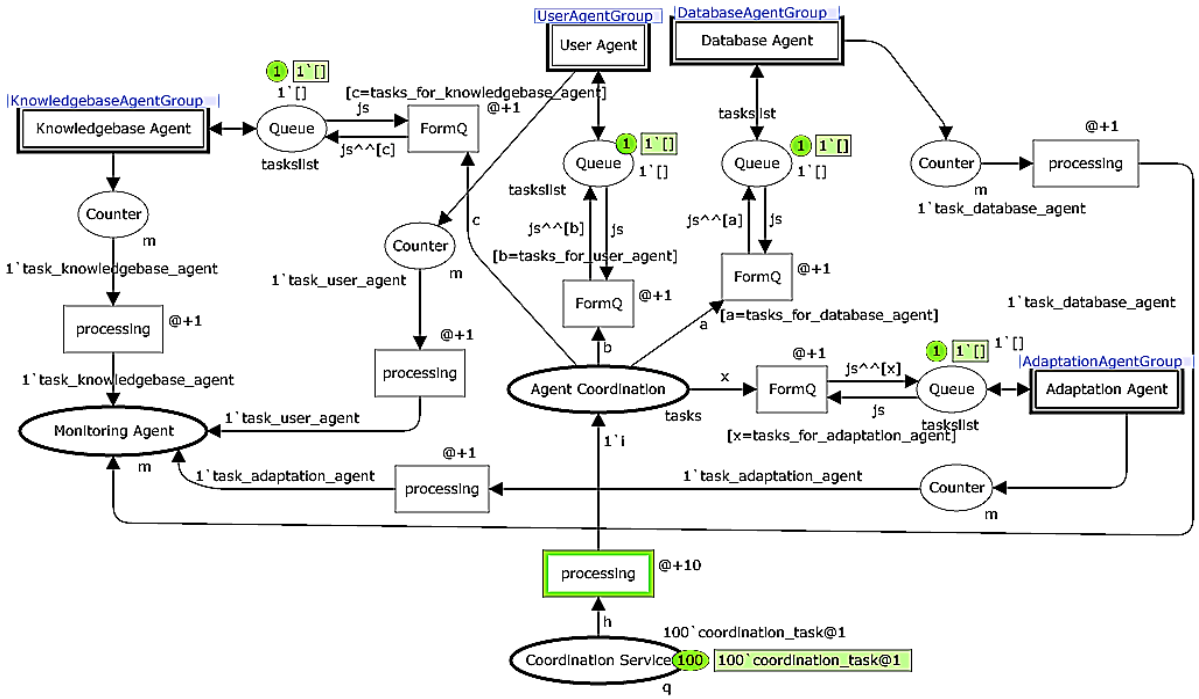


Рис. 2. Схема начальной стадии формирования задач

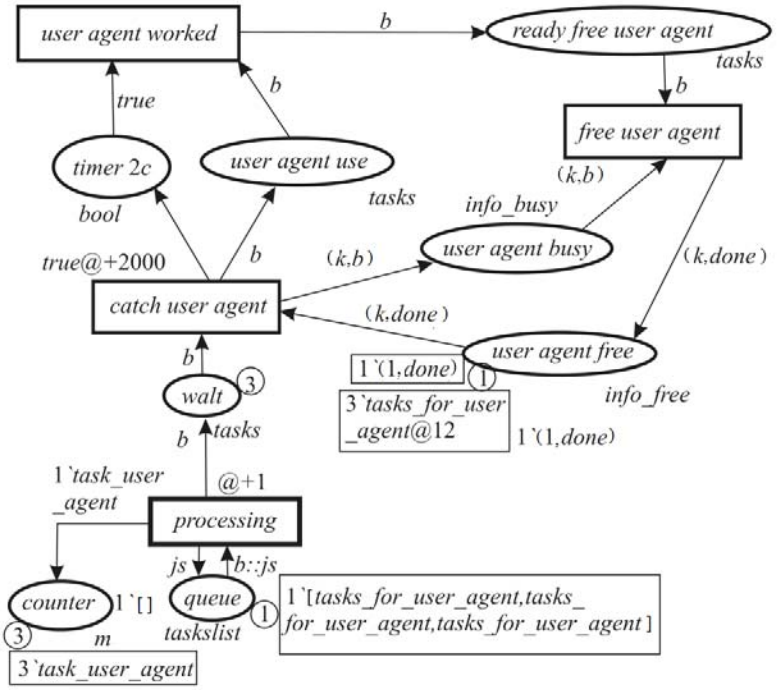


Рис. 3. Процесс обработки задач агентом пользователя

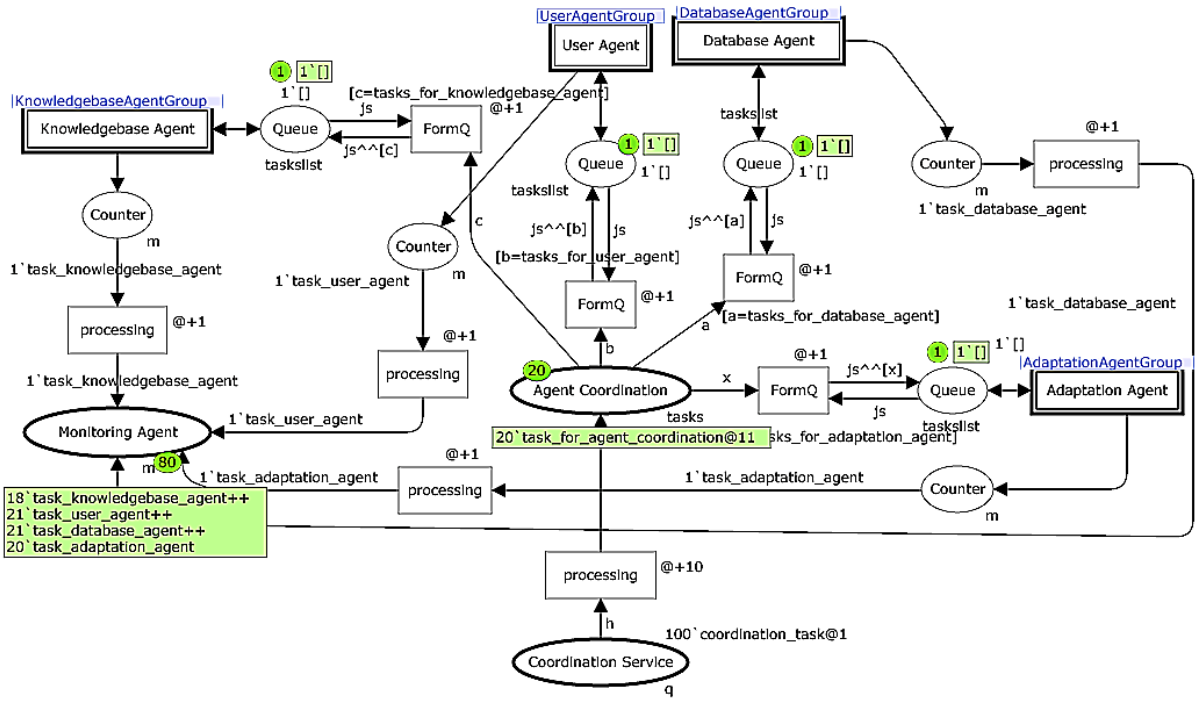


Рис. 4. Схема финальной стадии моделирования взаимодействия агентов

Адаптация механизмов работы системы

Под адаптацией понимается возможность приспосабливания к изменениям, возникающим в среде функционирования. Адаптивной информационной системой является система, способная менять алгоритмы функционирования в зависимости от существующих условий. Основной особенностью адаптивных многоагентных информационных систем является их способность к функционированию в условиях ввода в работу новых и вывода из строя действующих агентов без остановки всей системы, предоставлению интерфейсов с наиболее используемыми наборами инструментов. Причиной изменения состава агентов является необходимость их количественного наращивания в случае перегрузок. Использование двухуровневой архитектуры с функциональным разделением агентов и выделением соответствующих агентов, отвечающих за адаптацию, позволило производить балансировку нагрузки на исполняющие элементы.

При разработке многоагентных информационных систем на основе принципа адаптации в число решаемых задач входят:

1. динамическая реконфигурация путем изменения состава агентов и их взаимосвязей;
2. повышение эффективности при обработке запросов.

Алгоритм динамической реконфигурации основан на применении механизмов:

1. регистрации агентов у агента-координатора взаимодействия путем переговоров;
2. мониторинга функционирования многоагентной системы;
3. определения агентов для обработки вновь поступающих запросов.

При реконфигурации избыточные ресурсы системы вводятся в работу по мере перегрузки основных ресурсов. Вновь вводимые компоненты системы могут как находиться в резервном режиме, так и активизироваться на серверах при возникновении необходимости. Агент мониторинга реализует заданную программу мониторинга и отправляет данные агенту координации, на основании чего производится формирование списка агентов, способных выполнить запрашиваемые функции. Результаты моделирования сохраняются в поименованных переменных и характеризуют загрузку агентов, определяемую по результатам тестирования (в виде числа исполняемых ими задач).

Рассмотрим алгоритм динамического распределения запросов. Особенностью многоагентных адаптивных систем является изменяющаяся во времени структура и взаимосвязи. Характерная черта алгоритмов распределения запросов между агентами – реализация переговоров о возможности выполнения ими новых задач. Если единичный агент содержит в своей очереди достаточно большое количество задач (более 200), по шаблону перегруженного агента создается его копия. Агент мониторинга фиксирует количество задач у всех копий агентов. Если количество задач у копии агента превышает предельно допустимое установленное в системе значение, создается еще одна копия, и т.д. Если количество задач у копий агентов равно нулю, они исключаются из процесса работы системы, освобождаются ресурсы (рис. 5).

Реализация методики включает программирование агентов-координаторов запросов на основе правил распределения нагрузки между агентами-исполнителями запросов.

Алгоритм многоагентного выполнения запросов, таким образом, включает:

1. определение агентом-координатором списка возможных агентов на выполнение запросов к указанной предметной области;
2. уточнение списка агентов с учетом результатов мониторинга их функциональности;
3. определение плана реализации запросов на основе правил распределения нагрузки;
4. передачу задания на выполнение агентам-исполнителям. В случае поступления информации от агента мониторинга о том, что какой-либо агент перегружен, происходит корректировка плана обработки задач в соответствии с вышеприведенными пунктами.

Рис. 5. Механизм адаптации агентов

Рассмотрим алгоритм адаптации интерфейса для пользователей информационной системы применительно к следующим инструментам: «Новости и статьи», «Поиск», «Документы и файлы», «Заметки», «Проекты и задачи», «Объявления». На основе собранных данных получаем для инструмента «Новости и статьи» следующую статистику. В рабочие дни первой исследуемой недели пользователь отдела использовал данный инструмент с вероятностями: понедельник – 0,5, вторник – 0,25, среда – 0,33, четверг – 0,2, пятница – 0,44; на второй исследуемой неделе: понедельник – 0,33, вторник – 0,33, среда – 0,25, четверг – 0,29, пятница – 0,67. После анализа полученных данных выбираем дни, для которых вероятность принимала среднее значение более 0,4: понедельник, пятница. В ранее указанные дни текущего месяца блок новостей и статей будет находиться на главной странице рабочего интерфейса пользователя в раскрытом состоянии. В каждых последующих месяцах первые две недели будет производиться новая калибровка. Если количество новостей и статей на сайте будет уменьшаться, по умолчанию минимальное значение, равное 0,4, будет и дальше использоваться. Если количество новостей и статей на сайте будет расти вме-

сте с количеством кликов пользователя по соответствующим новостям, то текущее минимальное значение, равное 0,4, будет увеличиваться на значение, равное разнице между суммами средних вероятностей за 2 недели для текущего и прошлого месяцев.

Для инструмента «Поиск» учитывается количество переходов со страницы поисковой выдачи на соответствующие материалы, для инструмента «Документы и файлы» фиксируется количество используемых документов, для инструмента «Заметки» учитывается количество заметок, с которыми взаимодействует пользователь, для инструмента «Проекты и задачи» фиксируется количество обращений к элементам данного инструмента, для инструмента «Объявления» фиксируется количество обращений к элементам блока, и в дальнейшем для данных инструментов по аналогичному алгоритму с использованием минимального порога вычисляется необходимость отображения на главном интерфейсе. Также фиксируется время работы, затраченное на взаимодействие с каждым инструментом. В зависимости от длительности формируется распределение элементов по рабочей области интерфейса сверху вниз и слева направо.

Заключение

Разработанная структура адаптивной информационной системы позволила смоделировать в среде CPN Tools процесс взаимодействия агентов. В результате исследования работы модели на разных этапах произведен анализ системы с выявлением наиболее загруженных элементов. Проведение сбора статистических данных относительно использования инструментов пользователями предприятия позволило получить вероятностные показатели, на основе которых разработаны и исследованы процессы адаптации механизмов работы системы и интерфейса. Применение многоуровневой архитектуры при построении информационной системы на производственных предприятиях, относящихся, согласно общей классификации, к среднему типу [8], совместно с агентно-ориентированным подходом и элементами алгоритмов адаптации позволяет сократить время, затрачиваемое работниками на поиск необходимой информации, инструментов, упростить процесс взаимодействия пользователей с системой, модифицировать работу системы при высоких нагрузках с копированием исполняющих агентов.

Литература

1. Швецов А.Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы». – 2008. – 101 с.
2. Гурьянов В.И. Многоагентная модель среды поддержки программного продукта для систем со слоистой архитектурой // Управление большими системами: Сборник трудов. – 2008. – № 22. – С. 101–118.
3. Владимиров А.В. Общая модель взаимодействия интеллектуальных агентов в многоагентной адаптивной информационной системе. Вузовская наука – региону: Материалы 10-ой всероссийской научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – С. 104–106.
4. Рыбина Г.В., Паронджанов С.С. Общая модель взаимодействия интеллектуальных агентов и методы ее реализации // Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ 2008). Труды конференции. – М.: ЛЕНАНД, 2008. – Т. 2. – С. 382–390.
5. Jensen K., Christensen S. CPN Tools State Space Manual. – University of Aarhus. Department of Computer Science-2013. – 49 p.
6. Ratzer A.V., Wells L. CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets // Applications and Theory of Petri Nets 2003: 24th International Conference, ICATPN. – 2003. – P. 450–462.
7. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. – 2007. – P. 213–254.
8. Грузинов В.П., Грибов В.Д. Экономика предприятия: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 208 с.

Владимиров Александр Владимирович – Россия, Вологда, Вологодский государственный технический университет, аспирант, iclever7@yandex.ru

7 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 543.421/.422:535.137

ВЛИЯНИЕ ОСТРОВКОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА АГРЕГАЦИЮ И УСИЛЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПСЕВДОИЗОЦИАНИНА

Н.А. Торопов, Т.А. Вартанян

Приведены результаты экспериментального исследования влияния серебряных островковых пленок на агрегацию и оптические свойства молекулярных слоев псевдоизоцианинового красителя. Образцы создавались напылением металла на диэлектрические подложки в высоковакуумной камере и покрывались молекулярными слоями методом spin-coating. Морфология островковых пленок исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа. Спектры поглощения образцов снимались на спектрофотометре. Анализ компонентного состава молекулярных слоев с наночастицами Ag показал наличие полосы поглощения, которая не наблюдалась в спектрах поглощения тонкой пленки и спиртового раствора псевдоизоцианина. Идентификация обнаруженной полосы производилась по спектрам поглощения водного раствора псевдоизоциана и тонкой пленки, приготовленной из водно-спиртового раствора с добавлением NaCl. Установлено, что полученная полоса поглощения соответствует *J*-агрегатам. Таким образом, в присутствии наночастиц серебра увеличивается степень агрегации молекул псевдоизоцианина. При этом максимум оптической плотности молекулярного слоя возрастает в 20 раз.

Ключевые слова: островковая металлическая пленка, локализованный поверхностный плазмонный резонанс, молекулярный слой, серебро, псевдоизоцианин, *J*-агрегат.

Введение

Молекулы псевдоизоцианинов обладают склонностью к агрегации путем самосборки. В зависимости от строения и окружения они образуют димеры или более сложные полимолекулярные образования, такие как *J*-агрегаты. Последние являются молекулярными ансамблями, обладающими узкой и интенсивной полосой поглощения, смещенной относительно мономеров в более низкочастотную область спектра. *J*-агрегаты псевдоизоцианинов привлекают внимание исследователей благодаря своей способности проявлять как свойства отдельных молекул, так и способность к упорядоченной агрегации, называемой «полимерной» [1].

Благодаря большой величине оптической кубической нелинейности в растворах и тонких пленках *J*-агрегаты используются при решении важных прикладных задач, таких как создание оптических переключателей и устройств записи информации [2]. В последнее время были найдены новые перспективные применения *J*-агрегатов, в частности, при создании светодиодных устройств и преобразовании частоты лазерного излучения [3].

Оптическая плотность и люминесценция тонких органических пленок, содержащих ассоциаты молекул, намного меньше, чем у растворов. С другой стороны, для приготовления *J*-агрегатов в растворах необходима более высокая концентрация молекул красителя, при этом фотофизические свойства раствора являются крайне нестабильными. Альтернативным методом получения ассоциатов молекул является использование дополнительных компонентов, таких как поверхностно-активные вещества, соли металлов, полиэлектролиты и другие.

С точки зрения использования в приложениях твердотельные планарные системы молекул и их агрегатов являются более перспективными, чем растворы. Таким образом, в настоящей работе ставится задача экспериментальной проверки возможности получения *J*-агрегатов молекул псевдоизоцианина, во-первых, в тонких пленках на поверхности диэлектрика, во-вторых, со значительно усиленными абсорбционными свойствами, близкими к свойствам растворов.

Для решения поставленной задачи предложено использовать наночастицы серебра, поскольку известно, что за счет возбуждения в частицах благородных металлов локализованных поверхностных плазмонных резонансов в видимой области спектра в окружающих их органических молекулах происходит усиление поглощения [4], флуоресценции [5] и комбинационного рассеяния [6].

Приготовление островковых металлических и органических тонких пленок

В работе исследовался псевдоизоцианиновый краситель 1,1'-диэтилхино-2,2'-монометинцианин йодид. Молекулы этого красителя состоят из двух гетероциклических концевых групп, содержащих атомы азота, и одной метиновой группы –CH=, связывающей концевые. Были приготовлены 4 типа образцов: спиртовые и водные растворы псевдоизоцианиновых молекул, тонкие пленки молекул на поверхности кварца и тонкие пленки молекул на поверхности кварца с наночастицами серебра.

Органическая тонкая пленка была приготовлена нанесением спиртового раствора на кварцевую подложку. Для предотвращения выпадения осадка с последующим образованием на поверхности кристаллитов красителя использовался разбавленный спиртовой раствор. Концентрация молекул в нем оп-

ределялась с помощью абсорбционной спектроскопии и равнялась $5{,}32 \cdot 10^{-3}$ моль/л. Для образования равномерного слоя при нанесении красителя подложка вращалась со скоростью до 4000 об/мин (метод spin-coating). Толщина органической пленки определялась по концентрации раствора молекул, снятых с подложки, и составляла приблизительно 22 условных мономолекулярных слоя.

Для получения органических тонких пленок с большой относительной концентрацией *J*-агрегатов в используемый спиртовой раствор псевдоизоцианина добавлялся раствор хлорида натрия в дистиллированной воде. Полученная смесь наносилась на кварцевую подложку методом выпаривания.

Для исследования образцов гибридов, состоящих из органических тонких пленок и островковых металлических пленок, наночастицы серебра получали напылением металла в вакуумной камере PVD 75 (производства Kurt J. Lesker Company, США) на разогретую подложку ($T = 100°C$) при давлении остаточных газов $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Эквивалентная толщина серебряной пленки определялась кварцевым датчиком и составляла 4 нм. Зарождение наноостровков серебра происходило случайным образом на дефектах поверхности. Согласно исследованиям, проводившимся на сканирующем электронном микроскопе, поверхность представляет собой неоднородный по формам ансамбль наноостровков серебра с характерным размером 10–30 нм.

При проведении всех экспериментов с островковыми пленками было учтено, что при контакте с растворителями часть островков отделяется от поверхности, при этом оптическая плотность образца может уменьшаться почти в 2 раза. Для получения воспроизводимых результатов перед приготовлением тонких пленок красителя подложка с наночастицами длительно выдерживалась в этиловом спирте для отделения непрочно закрепленных островков. После этого пленка становилась достаточно устойчивой и покрывалась молекулами псевдоизоцианина методом spin-coating. Согласно проводившимся исследованиям [4], количество адсорбированных молекул на поверхности с наночастицами несущественно (3–10%) больше, чем на поверхности чистого кварца.

Абсорбционные спектры растворов и тонких пленок молекул псевдоизоцианина

На рис. 1 представлены спектры оптической плотности спиртового раствора псевдоизоцианина и тонкой пленки на поверхности кварца. Для сравнения спектральных положений максимумов спектры приведены в относительных единицах. Абсолютная величина оптической плотности раствора молекул в кювете толщиной 1 см равна 1,101, тонкой пленки – 0,008. Одной из особенностей молекул псевдоизоцианина является малость сечения поглощения $\sigma = 1{,}25 \cdot 10^{-16}$ см^2 по сравнению с другими молекулами ее гомологического ряда. Вследствие этой особенности величина оптической плотности довольно мала, а спектр молекулярного слоя зашумлен. Полоса поглощения спиртового раствора красителя имеет три максимума на длинах волн 460, 493 и 527 нм. Такая структура полосы обусловлена избирательным возбуждением определенных типов вибрации скелета молекулы согласно принципу Франка–Кондона.

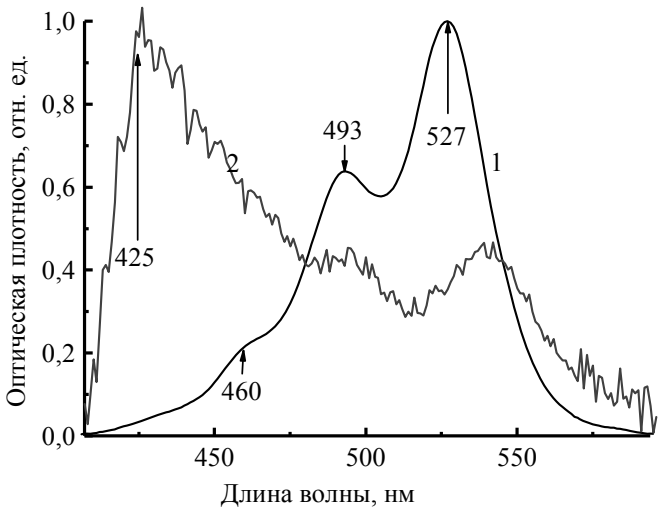


Рис. 1. Спектры оптической плотности: 1 – спиртового раствора псевдоизоцианина; 2 – тонкой пленки псевдоизоцианина на поверхности кварца. Стрелками указаны наиболее вероятные оптические переходы в мономерах

Спектр поглощения слоя молекул вследствие ассиметрии взаимодействия с подложкой отличается от спектра поглощения раствора смещением максимумов по длинам волн. Максимум оптической плотности тонкой пленки на длине волны 425 нм обусловлен, вероятно, оптическим переходом, возбуждение которого в свободной молекуле запрещено правилами отбора для дипольных переходов [7].

На рис. 2 приведены нормированные спектры поглощения водного раствора молекул и тонкой пленки с полосой поглощения, характерной для *J*-агрегатов. Оптическая плотность раствора в кювете толщиной 63 мкм – 0,093.

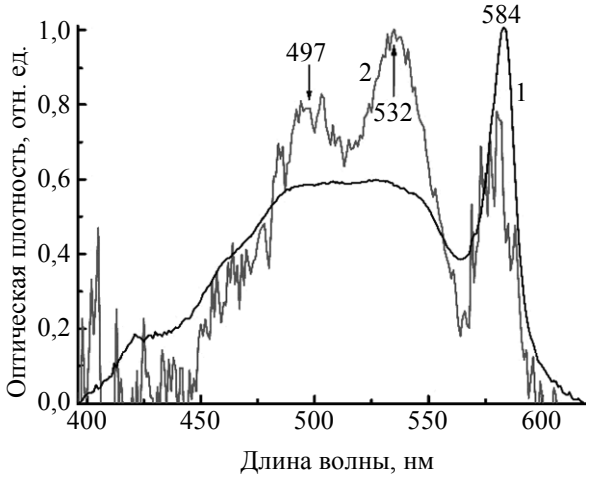


Рис. 2. Спектры оптической плотности: 1 – водного раствора молекул псевдоизоцианина; 2 – тонкой пленки, приготовленной из водно-солевого раствора на поверхности кварца. Стрелками указаны наиболее вероятные оптические переходы в мономерах, 584 – полоса поглощения *J*-агрегатов

Максимум оптической плотности водного раствора (кривая 1, рис. 2) на длине волны 584 нм обусловлен формированием *J*-агрегатов. Их самосборке способствует большое число водородных связей [1, 8]. Максимумы поглощения водного раствора, аналогичные максимумам поглощения спиртового раствора (493 и 527 нм), перекрываются. Полученный спектр поглощения водного раствора согласуется с экспериментальными данными для псевдоизоцианина, приведенными в работе [1].

Максимум оптической плотности тонкой пленки, полученной из водно-солевого раствора красителя, равен 0,004. При этом поглощение в коротковолновой области спектра тонкой пленки (зашумлено) уменьшилось, в отличие от спектра поглощения тонкой пленки, приготовленной из спиртового раствора (кривая 2, рис. 1). Длинноволновый край спектра поглощения тонкой пленки, приготовленной с использованием раствора NaCl, демонстрирует появление нового компонента с максимумом, характерным молекулярным *J*-агрегатам.

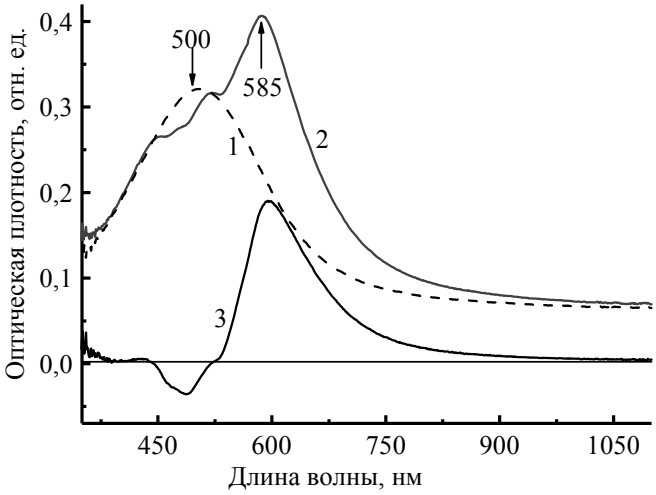


Рис. 3. Спектры оптической плотности: 1 – островковой пленки Ag на поверхности кварца; 2 – серебряной пленки, покрытой молекулярным слоем псевдоизоцианина; 3 – разность оптических плотностей. Стрелками обозначены максимумы оптической плотности островковой пленки, покрытой и не покрытой молекулярным слоем псевдоизоцианина

На рис. 3 приведены спектры оптической плотности серебряной островковой пленки на поверхности кварца. Поглощение металлическими частицами (кривая 1, рис. 3) обусловлено возбуждением локализованных поверхностных плазмонных резонансов. Исследования спектров островковых металлических пленок, проведенные авторами ранее методом выжигания постоянных спектральных провалов [4], показали, что неоднородность уширения спектра связана с различием частиц по формам. Более сплюснутые сферические частицы вносят вклад в длинноволновую часть спектра, округлые частицы имеют резо-

нансы ближе к ультрафиолетовой области. Неоднородность ансамбля наночастиц неблагоприятна для приложений, однако позволяет исследовать влияние локализованных плазмонных резонансов на органические молекулярные слои, поглощающие в довольно большом интервале длин волн.

Нанесение молекул псевдоизоцианина на островковую серебряную пленку приводит к увеличению оптической плотности молекулярного слоя почти в 20 раз как по пиковому значению, так и по интегральной величине поглощения (по сравнению со спектром на рис. 1). Следует отметить наличие области уменьшения оптической плотности гибридного материала, которая связана с аномальной дисперсией показателя преломления красителя [4]. Пик поглощения гибридного материала расположен на 585 нм и соответствует пику *J*-агрегатов (рис. 2).

Таким образом, авторами экспериментально получены *J*-агрегаты в твердотельной тонкой пленке. Оптическая плотность полученной полосы ассоциатов значительно больше оптической плотности аналогичной полосы, полученной с помощью раствора NaCl. Увеличение поглощения является следствием действия ближнего поля серебряных наночастиц, которое является усиленным по сравнению с полем падающей волны.

Заключение

В работе экспериментально продемонстрирована возможность получения *J*-агрегатов псевдоизоцианина в твердотельных молекулярных слоях на поверхности диэлектрика с наночастицами серебра. Полученная полоса поглощения *J*-агрегатов верифицирована путем сравнения с полосами поглощения концентрированного водного раствора псевдоизоцианина и полосами поглощения тонкой пленки, приготовленной из водно-спиртового раствора с добавлением электролита. Показано, что максимум оптической плотности молекулярного слоя псевдоизоцианина на кварцевой подложке с наночастицами серебра увеличился в 20 раз по сравнению с максимумом оптической плотности молекулярного слоя, приготовленного без наночастиц.

Полученные результаты станут основой для проведения экспериментов по исследованию модификации спектров флуоресценции органических молекул в ближнем поле металлических наночастиц.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-02-01020 и 12-02-00853) и НИУ ИТМО.

Литература

1. Теренин А.Н. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений. – Л.: Наука, Ленинград. отд-ние, 1967. – 616 с.
2. Старовойтов А.А., Калитеевская Е.Н., Разумова Т.К., Крутякова В.П. Фотостимулированная модификация структуры нанометровых слоев молекул полиметиновых красителей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 4 (86). – С. 78–81.
3. Чибисов А.К., Славнова Т.Д., Хёрнер Х. Самосборка молекул полиметиновых красителей в растворах. Кинетический аспект агрегации // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3. – № 1–2. – С. 26–41.
4. Торопов Н.А., Калитеевская Е.Н., Леонов Н.Б., Вартанян Т.А. Взаимная модификация плазмонных резонансов наночастиц серебра и абсорбционных свойств молекулярных слоев полиметиновых красителей на поверхности сапфира // Оптика и спектроскопия. – 2012. – Т. 113. – № 6. – С. 684–689.
5. Торопов Н.А., Леонов Н.Б., Вартанян Т.А. Использование локализованных плазмонов для модификации оптических свойств и конформационных перестроек органических молекул // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. 76. – № 12. – С. 1461–1464.
6. Fleischmann M., Hendra P.J., McQillan A.J. Raman spectra of pyridine absorbed at a silver electrode // Chem. Phys. Lett. – 1974. – V. 26. – № 2. – P. 163–166.
7. Борисевич Н.А. Возбужденные состояния сложных молекул в газовой фазе. – Минск: Наука и техника, 1967. – 247 с.
8. Ищенко А.А. Строение и спектрально-люминесцентные свойства полиметиновых красителей. – Киев: Наукова Думка, 1994. – 232 с.

Торопов Никита Александрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, инженер, nikita.a.toropov@gmail.com

Вартанян Тигран Арменакович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, зав. лабораторией, tigran@vartanyan.com

УДК 547.97 535.8 541.147

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ МИКРОЧИПОВ

И.Ю. Денисюк, Ю.Э. Бурункова, Н.О. Собещук

Рассмотрены результаты первых экспериментов по исследованию метода синтеза наночастиц, содержащих ионы эрбия. Использование низкотемпературного синтеза (180°C) в безводном растворителе вместо стандартного метода синтеза в водной среде с последующей высокотемпературной обработкой (500–750°C) позволяет исключить коагуляцию исходных наночастиц, что дает возможность сохранить их исходный нанометровый размер и, следовательно, получить прозрачный нанокомпозиционный материал, пригодный для применения в фотонике. Сравнение экспериментальных данных (спектров поглощения и люминесценции) с литературными подтвердило получение нанокристаллов оксида, легированного эрбием.

Ключевые слова: нанокомпозит, нанокристалл, эрбий, люминесценция, телекоммуникация, эрбиевый усилитель.

Введение

Значительное достижение последних лет в области телекоммуникации – создание эрбиевых усилителей оптоволоконного тракта – позволило отказаться от регенераторов и сделать оптические линии полностью оптическими. В 1990 г. были созданы первые оптические усилители на основе волокна, легированного эрбием (EDFA), и стали очевидными возможности их широкого использования в протяженных линиях связи. В настоящее время усилители основаны на использовании отрезков кварцевого оптоволокна, легированного эрбием (Er), но малая концентрация эрбия в нем не позволяет миниатюризировать усилители до размеров, обеспечивающих их изготовление на одном чипе.

Для решения этих задач в последние годы ведутся активные исследования планарных волноводных усилителей на базе Er-содержащих полимеров или наночастиц. Значительное, на несколько порядков, увеличение концентрации Er позволяет уменьшить активную длину волновода до единиц миллиметров [1]. В работе [2] приведены экспериментальные результаты исследований оптического усилителя, созданного на основе планарного оптического волновода, состоящего из полимера полиметилметакрилата (ПММА), легированного органическим соединением Er, что демонстрирует перспективность предлагаемого подхода, основанного на нанокристаллах, легированных Er, внедренных в термопластический прозрачный полимер.

Экспериментальная часть

Данное исследование является продолжением работ авторов в области наноструктурирования полимеров оптического назначения [3–5]. В указанных работах были синтезированы оптически прозрачные нанокомпозиты, получаемые при синтезе полимерной матрицы в присутствии наночастиц, активно воздействующих на морфологию материала. Как было обнаружено, наночастицы SiO_2 активно участвуют в процессе УФ-полимеризации, и их введение в полимеризуемый состав приводит к образованию прозрачного и малорассеивающего нанокомпозита с хорошими эксплуатационными свойствами. Указанный подход послужил основой для выполненного в настоящей работе исследования полимерного прозрачного нанокомпозита, содержащего наночастицы оксидов редкоземельных элементов.

Объектом исследований является прозрачный нанокомпозиционный материал на основе светоотверждаемой мономерной акрилатной композиции и люминесцентных наночастиц оксидов иттербия и эрбия, которые синтезируются различными методами. Наиболее распространен, например, в соответствии с работой [6], способ получения наночастиц редкоземельных элементов методом проведения химической реакции в водной среде с последующей термообработкой при 750°C, которая необходима для конверсии гидроокиси в окись. К сожалению, при этом происходит спекание и укрупнение наночастиц от 2–3 нм (исходные частицы) до 100 нм после термообработки. В результате нанокомпозит становится рассеивающим и непригодным для применения в фотонике.

В отличие от вышеуказанных работ, был исследован метод синтеза, основанный на проведении реакции в высококипящем безводном растворителе, когда сразу образуется оксид и последующая его термообработка не требуется. Основное внимание уделялось поиску условий синтеза и исследованию полученных наночастиц с целью подтверждения получения нанокристаллов, а не аморфной или гидрокси фазы.

Способ синтеза состоял в следующем. Смесь хлоридов эрбия и иттербия (в массовом соотношении 1:5 соответственно) растворялась в течение часа в безводном глицерине с использованием ультразвука при температуре 100°C. После добавления водного раствора гидроксида натрия композиция подвергалась ультразвуковому перемешиванию и термообработке в течение часа при 140°C, а затем выдерживалась еще 4 часа при температуре 180°C. В результате данной реакции, проходящей в безводном растворителе при температуре существенно выше температуры кипения воды, не происходит образования гидроокиси, поэтому отсутствует необходимость использования высоких температур для ее разложения до оксида, а за счет использования для синтеза вязкой среды не происходит агломерации наночастиц. Для

выделения наночастиц из полученного раствора использовалась многократная промывка в изопропиловом спирте, в растворе которого наночастицы могут быть легко введены в любую полимерную матрицу для дальнейшего использования и исследования.

Далее была проведена серия исследований для доказательства получения нанокристаллической фазы. Доказательством получения кристаллической фазы служат спектры поглощения и люминесценции и их сравнение со спектрами, полученными на наночастицах, синтезированных классическим методом (литературные данные) [6]. При сравнении необходимо учитывать, что наноструктурное состояние вещества обычно приводит к уширению максимумов на спектре. Кроме того, в результате низкой концентрации нанокристаллической фазы спектр люминесценции оказался сильно зашумленным.

На рис. 1 представлен спектр поглощения нанокомпозита на основе синтезированных наночастиц, который содержит два характерных для ионов Er максимума на 520 и 540 нм.

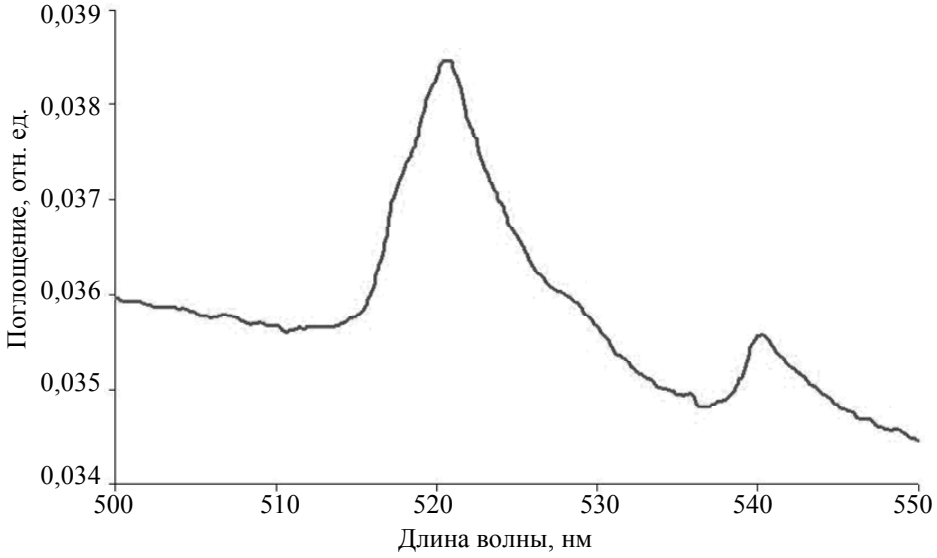


Рис. 1. Спектр оптической плотности полимерного нанокомпозита на основе частиц эрбия и иттербия

На рис. 2 приведен спектр люминесценции полученного нанокомпозита и спектр люминесценции кристаллов оксида, содержащего ионы Er, полученных путем высокотемпературного синтеза [6].

Сравнение максимумов люминесценции наночастиц с люминесценцией кристаллов подтверждает, что были получены неорганические нанокристаллы оксида, легированные Er (наличие двух характерных максимумов), что доказывает правильность пути, выбранного в данной работе. Уширение спектра, вероятно, объясняется наноразмерными эффектами.

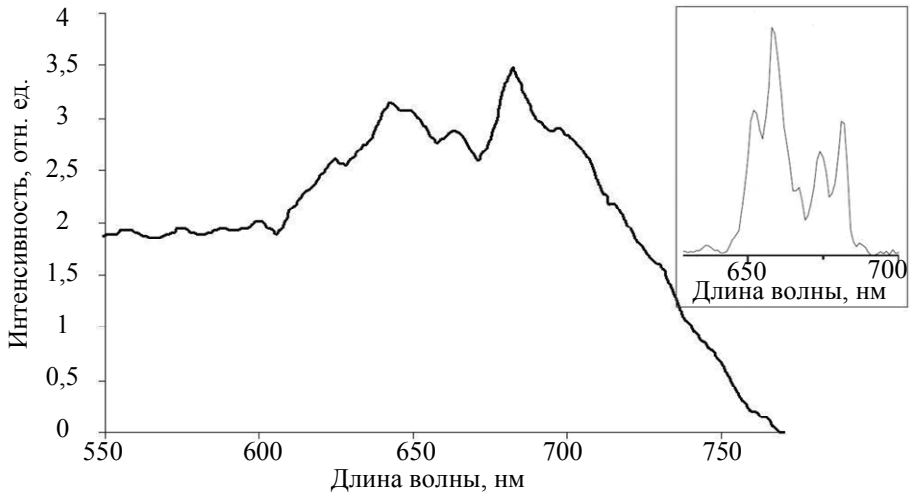


Рис. 2. Спектр люминесценции нанокомпозита в видимом диапазоне, измеренный при длине волны возбуждения 500 нм. Заметны максимумы на длине волны 650 и 700 нм. На врезке справа для сравнения представлен спектр люминесценции кристаллов, содержащих ионы эрбия [6]

Заключение

Таким образом, результаты первых экспериментов показывают возможность проведения безводного синтеза наночастиц, легированных Er, процесс которого не требует прокаливания материала при высоких температурах и не приводит к спеканию наночастиц. Последующее их введение в полимерную матрицу легко осуществимо обычными способами. Сравнение спектра люминесценции полученных наночастиц с известными спектрами крупнокристаллических дисперсий подтверждает природу центров люминесценции как ионов Er. В дальнейшем предполагается продолжение работы с целью повышения квантового выхода люминесценции, что необходимо для практического использования материала, а также для получения детальных спектров.

Исследования проводились в рамках НИР № 411394 (номер государственной регистрации 01201263998 от 18.06.2012), финансируемой из централизованных средств НИУ ИТМО.

Литература

1. Quang A.Q.Le, Hierle R., Zyss J., Ledoux I. Demonstration of net gain at 1550 nm in an erbium-doped polymersingle mode rib waveguide // Applied physics letters. – 2006. – V. 89. – P. 141124.
2. Polman A. Exciting erbium-doped planar optical amplifier materials // SPIE. – 2000. – V. 3942. – P. 2–13.
3. Бурункова Ю.Э., Семьина С.А., Капорский Л.Н., Левичев В.В. Наномодифицированные оптические акрилатные композиты // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 10. – С. 54–56.
4. Denisyuk I.Yu., Williams T.R., Burunkova J.E. Hybrid optical material based on high nanoparticles concentration in UV-curable polymers // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2008. – V. 497. – P. 142–153.
5. Denisyuk I.Yu., Burunkova J.A., Kokenyesi S., Bulgakova V.G., Fokina M.Iv. Optical nanocomposites based on high nanoparticles concentration and its holographic application. – Nanocrystals, Sudheer Neralla (Ed.), InTech Europe, Croatia, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.intechopen.com/articles/show/title/optical-nanocomposites-based-on-high-nanoparticles-concentration-and-its-holographic-application, свободный. Яз. рус. (дата обращения 01.09.2013).
6. Pires A.M., Serra O.A., Davalos M.R. Morphological and luminescent studies on nanosized Er, Yb-yttrium oxide up-converter prepared from different precursors // Journal of Luminescence. – 2005. – V. 113. – P. 174–182.

Денисюк Игорь Юрьевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, denisiuk@mail.ifmo.ru

Бурункова Юлия Эдуардовна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, burunj@list.ru

Собещук Нина Олеговна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, daedraazura@gmail.com

УДК 537.29

ПРЕЦИЗИОННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

А.И. Денисюк, Ф.Э. Комиссаренко

Представлен новый метод перемещения частиц, основанный на электростатическом взаимодействии между объектами, заряжающимися под действием сфокусированного пучка сканирующего электронного микроскопа. Метод позволяет контролируемо подхватывать, переносить и скидывать микро- и наночастицы, а также визуализировать процесс и результат перемещения в реальном времени на электронном микроскопе. Представленные экспериментальные результаты показывают возможности метода на примере перемещения частиц Al_2O_3, WO_3 и вольфрама с размерами от 50 нм до 1 мкм под действием электрического поля заряженного металлического острия. Экспериментальные результаты иллюстрирует теоретическая модель, согласно которой диэлектрофоретическая сила, создаваемая заряженным острием, притягивает частицы, которые удерживаются ван-дер-ваальсовыми силами на подложке или других частицах. Метод может найти применение при создании структур на основе сборок из микро- и наночастиц, создании специализированных зондов для сканирующих зондовых микроскопов, а также при оценке сил взаимодействия между частицами.

Ключевые слова: электронная микроскопия, манипулирование микро- и наночастицами, диэлектрофорез.

Введение

Прецизионное перемещение микро- и наночастиц может быть выполнено с помощью атомно-силовых и электронных микроскопов. Перемещение объектов в атомно-силовых микроскопах основывается на механическом или электростатическом взаимодействии между частицей и зондом микроскопа [1]. Однако атомно-силовой микроскоп не позволяет визуализировать результат перемещения: нельзя

получать изображения созданных комплексных структур с высоким аспектным соотношением или визуализировать результат модификации зонда микроскопа. Электронные микроскопы не имеют подобных ограничений по визуализации полученных структур. Методы перемещения объектов внутри электронных микроскопов основываются на механическом взаимодействии манипулятора и частицы при одновременной визуализации электронных изображений [2] или путем прямого воздействия поля электронного пучка на перемещаемый объект. Однако последний метод вследствие малости поля электронов может быть реализован лишь для объектов, находящихся в специальных условиях (жидкостная ячейка [3] или расплав [4]).

В настоящей работе представлен метод перемещения микро- и наночастиц, который основан на электростатическом взаимодействии между объектами, заряжающимися под действием электронного пучка сканирующего электронного микроскопа. Метод позволяет прецизионно перемещать (подхватывать, переносить и скидывать) частицы различных материалов широкого диапазона размеров, а также визуализировать процесс и результат перемещения в реальном времени с высоким разрешением сфокусированного электронного пучка. Отдельные результаты, описывающие процесс перемещения частиц в электронном микроскопе, уже были представлены в работах [5, 6]. В данной работе метод перемещения частиц под электронным пучком рассмотрен авторами более подробно: получены экспериментальные результаты перемещения микро- и наночастиц различных материалов, а также представлена теоретическая модель, которая хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

Результаты экспериментального исследования

Эксперименты проводились на электронном микроскопе Carl Zeiss Neon 40, который был дополнительно оснащен механическим микроманипулятором Kleindiek MM3A-EM для механического позиционирования нанообъектов под электронным пучком. На манипуляторе закреплялось металлическое острие, которое представляло собой кантилевер атомно-силового микроскопа Nanoworld PNP-DB. Выбор кантилевера в качестве острия обусловлен тем, что его размеры и форма гарантируются производителем. Используемые кантилеверы были изготовлены из нитрида кремния и имели радиус скругления острия 10 нм. На кантилевер был напылен слой золота толщиной 30 нм. Важной особенностью и условием эксперимента является также то, что металлизованный кантилевер при закреплении на манипулятор микроскопа не был заземлен.

В качестве объектов экспериментов по перемещению микро- и нанообъектов использовались микро- и наночастицы оксида алюминия Al_2O_3, оксида вольфрама WO_3 и вольфрама W, синтезированные плазмотермическим методом в компании «Плазмотерм». Порошок частиц определенного типа растворялся в деионизованной воде и затем высаживался из раствора на свежий скол монокристаллической подложки арсенида галлия GaAs.

Участок подложки с частицами сканировался электронным пучком (ускоряющее напряжение 5 кВ, ток пучка 60 пА). В область сканирования также вводилось острие кантилевера, прикрепленного к манипулятору. При подведении острия кантилевера к частице наблюдалось перемещение последней на острие (подхват частицы). Как было показано в работе [5], эффект перемещения частиц основывается на зарядке металлического острия под действием электронного пучка и создании градиентного электростатического поля. При этом частицы, которые удерживаются на подложке посредством ван-дер-ваальсового взаимодействия, будут притягиваться к острию за счет диэлектрофоретической силы (рис. 1).

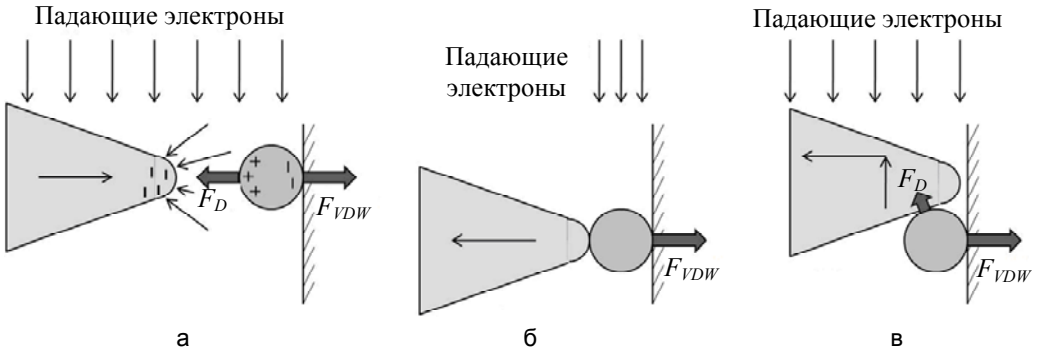


Рис. 1. Иллюстрация подхвата частицы с подложки, основанного на действии на частицу диэлектрофоретической силы, создаваемой заряженным острием (а), и контролируемого сброса частицы на подложку, основанного на прекращении зарядки острия электронами (б) или отвода острия в сторону так, что диэлектрофоретическая сила действует на частицу лишь слабой боковой компонентой (в)

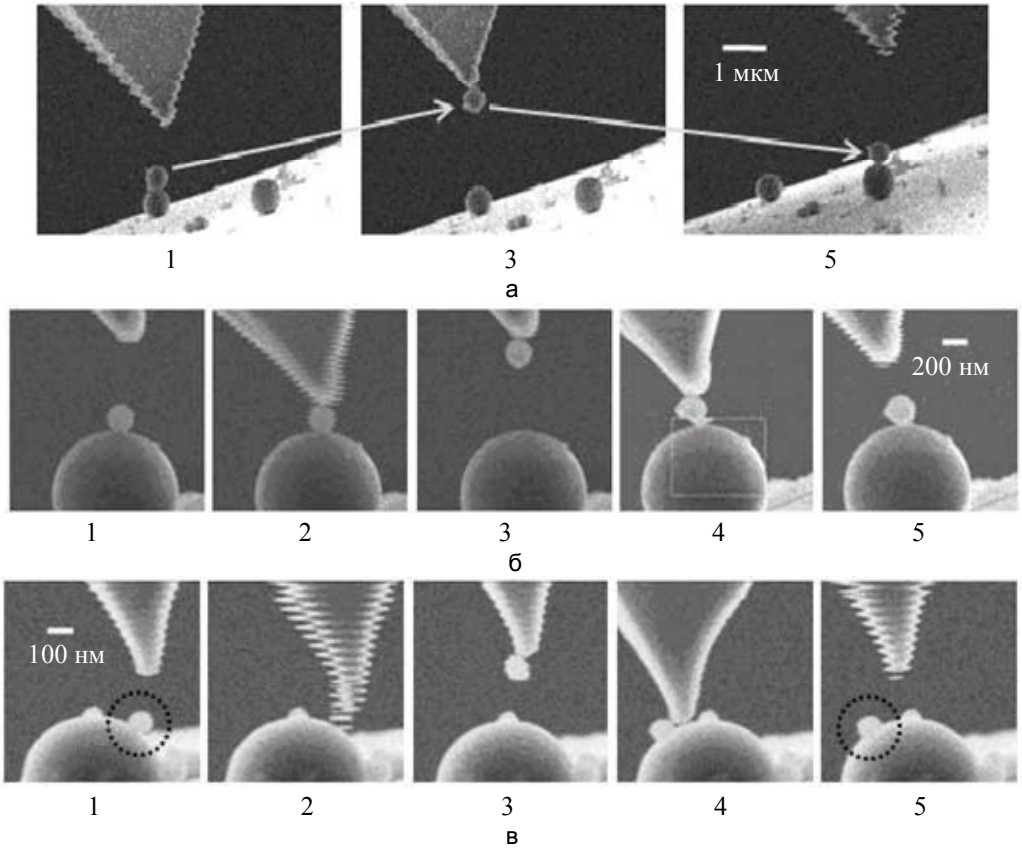
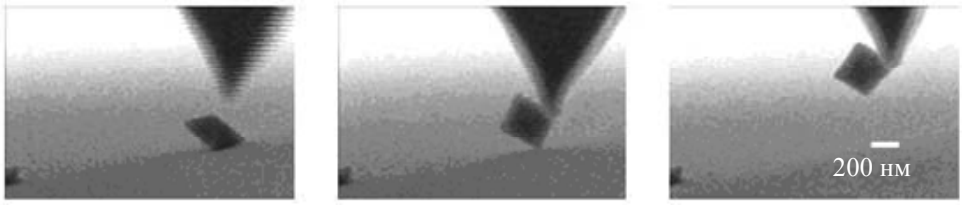


Рис. 2. Манипулирование со сферическими частицами Al_2O_3 диаметром 500 нм (а), 200 нм (б) и 80 нм (в). Манипулирование включало следующие фазы: приближение к частице (1), подхват и фиксация (2), перемещение частицы (3), сброс (4) и отвод от частицы (5)

На рис. 2 показаны микрофотографии, иллюстрирующие результаты по перемещению сферических частиц Al_2O_3 с размерами 500 нм, 200 нм и 80 нм. Подхват и скидывание частиц осуществлялись не с подложки, а с других частиц, что демонстрирует возможности метода, а также позволяет более точно смоделировать результаты расчета ван-дер-ваальсового взаимодействия двух частиц. Во всех экспериментах по перемещению частиц Al_2O_3 подхват частиц и ее фиксация на острие происходили при приближении острия к частице. Подхваченная частица, удерживаемая на острие ван-дер-ваальсовыми силами, переносилась затем в другое место, где ее можно было контролируемо сбросить. Сброс частицы осуществлялся двумя способами. Частица, удерживаемая на острие манипулятора, подводилась к месту сброса – другой, более крупной частице. Затем электронный пучок уводился с острия и более не заряжал его, что приводило к ослаблению диэлектрофоретической силы (рис. 1, б; рис. 2, б), или производился отвод острия в сторону так, что диэлектрофоретическая сила действовала на частицу лишь слабой боковой компонентой (рис. 1, в; рис. 2, в). В обоих случаях перемещаемая частица фиксировалась на крупной частице за счет того, что сила ван-дер-ваальсового взаимодействия оказывалась больше вследствие большей площади контакта при взаимодействии частицы и острия.

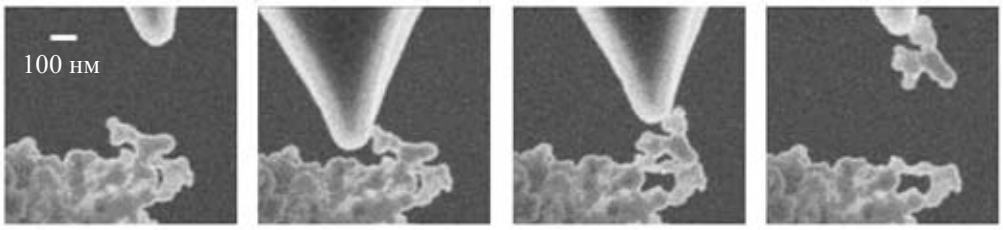
На рис. 3 показаны микрофотографии, показывающие подхват частицы WO_3. Эти частицы, в отличие от сферических частиц Al_2O_3, имеют форму октаэдров и сила их взаимодействия с подложкой зависит от типа контакта частицы – плоскость, ребро или вершина. Когда частица WO_3 контактирует с подложкой своей плоскостью или ребром, ее невозможно оторвать с помощью диэлектрофоретической силы, создаваемой заряженным острием. Однако острием можно механически повернуть частицу так, что она будет контактировать с подложкой только своей вершиной. После этого подхват частицы и ее фиксация на острие под действием диэлектрофоретической силы становятся возможными.

На рис. 4 показаны микрофотографии, показывающие подхват частиц вольфрама. Частицы вольфрама образуют конгломераты, что препятствует отрыву одиночных частиц. Как и в случае с подхватом частиц WO_3, использовалось сначала механическое перемещение группы частиц, чтобы уменьшить площадь их контакта с оставшимися частицами. После этого эту группу частиц можно было подхватить на острие за счет диэлектрофоретического взаимодействия. Примечательно, что, в отличие от частиц Al_2O_3 и WO_3 частицы вольфрама являются проводящими, однако и в этом случае диэлектрофоретический механизм подхвата частиц действует.



1 2 3

Рис. 3. Манипулирование частицы WO_3 (форма частицы – октаэдр).
Фазы манипулирования: приближение к частице (1), механическое перемещение частицы и подхват (2), фиксация на острие (3)



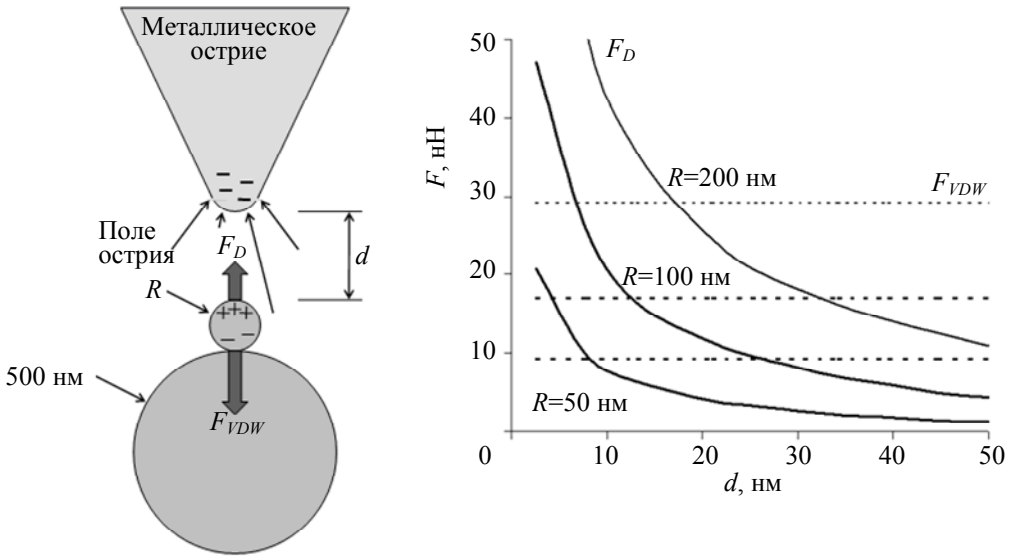
1 2 3 4

Рис. 4. Перемещение группы частиц вольфрама: подвод (1), механическое перемещение (2, 3), подхват и фиксация (4)

Моделирование процесса

Для анализа полученных экспериментальных результатов по перемещению частиц авторами предложена математическая модель. Согласно этой модели, частица удерживается на подложке (или поверхности другой частицы) посредством ван-дер-ваальсовой силы. Незаземленное металлизированное острие заряжается под действием электронного пучка и создает градиентное электростатическое поле. Величина напряженности поля ограничена вследствие стекания заряда с острия в результате автоэлектронной эмиссии. Электростатическое поле острия поляризует частицу и притягивает ее на острие за счет возникновения диэлектрофоретической силы.

Рассмотрим взаимодействие малой сферической частицы Al_2O_3 радиусом R (от 50 до 200 нм) с другой частицей Al_2O_3 радиусом 500 нм (рис. 2). Ван-дер-ваальсовая сила F_{VDW}, действующая между частицами, рассчитывается согласно формулам, представленным в работе [7]. Константа Хамакера для оксида алюминия составляет $1{,}5\times10^{-19}$ Дж [8], а расстояние между частицами d принято 0,35 нм (два усредненных ван-дер-ваальсовых радиуса для алюминия и кислорода).



а б

Рис. 5. Модель подхвата сферической частицы Al_2O_3 радиусом от 50 до 200 нм с поверхности более крупной частицы Al_2O_3 радиусом 500 нм (а). Результаты вычислений (б) показывают что подхват частицы (диэлектрофоретическая сила, создаваемая заряженным острием, превосходит ван-дер-ваальсовую силу, удерживающую частицу) происходит при расстоянии между острием и частицей менее 20 нм

Для определения диэлектрофоретической силы F_D, действующей на частицу со стороны острия, необходимо вычислить напряженность электрического поля, создаваемого заряженным острием. Учитывая стекание заряда с острия вследствие автоэлектронной эмиссии, получаем, что максимальное значение напряженности поля у поверхности золоченого острия с радиусом скругления 50 нм, согласно закону Фаулера–Нордгейма, составляет $2 \cdot 10^9$ В/м. В этом случае ток автоэлектронной эмиссии становится равным 100 пА, т.е. уравнивает ток электронного пучка, заряжающего острие. Расчет электростатического поля вокруг острия с учетом максимального значения напряженности поля у поверхности выполнен авторами с помощью метода конечных элементов. Расчеты показали, что при расстоянии между острием и частицей менее 20 нм диэлектрофоретическая сила, создаваемая заряженным острием, превосходит ван-дер-ваальсовую силу, удерживающую частицу, и в этом случае частица притягивается на острие (рис. 5, б). Это хорошо согласуется с наблюдаемым в эксперименте взаимодействием (рис. 2).

Заключение

В работе предложен новый метод перемещения частиц, основанный на электростатическом взаимодействии между микрообъектами, заряжающимися под действием электронного пучка. Эксперименты, проведенные для микро- и наночастиц оксида алюминия, оксида вольфрама и вольфрама, показывают, что частицы могут быть подхвачены, перенесены и контролируемо сброшены под действием электрического поля заряженного металлического острия. Предложена теоретическая модель. Согласно этой модели, диэлектрофоретическая сила, создаваемая заряженным металлическим острием, притягивает частицы, которые удерживаются на подложке (или другой частице) ван-дер-ваальсовыми силами. Проведенные расчеты показали хорошее соответствие модели и экспериментальных результатов.

Метод прецизионного перемещения микро- и наночастиц под воздействием электронного пучка может быть использован для создания специализированных зондов для сканирующей зондовой микроскопии (например, коллоидные зонды), создания различных устройств на основе сборок наночастиц (например, оптические антенны), а также для оценки сил взаимодействия между частицами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-08-01438 А.

Литература

1. Kim S., Shafiei F., Ratchford D., Li X. Controlled AFM manipulation of small nanoparticles and assembly of hybrid nanostructures // Nanotechnology. – 2011. – V. 22. – P. 115301.
2. Nakazato Y., Yuasa T., Sekine G., Miyazawa H., Jin M., Takeuchi S., Ariga Y., Mu-rakawa M. Micromanipulation system using scanning electron microscope // Microsyst Technol. – 2009. – V. 15. – P. 859–864.
3. Zheng H., Mirsaidov U.M., Wang L.-W., Matsudaira P. Electron beam manipulation of nanoparticles // Nano Lett. – 2012. – V. 12. – P. 5644−5648.
4. Oleshko V.P., Howe J.M. Are electron tweezers possible? // Ultramicroscopy. – 2011. – V. 111. – P. 1599–1606.
5. Комиссаренко Ф.Э., Денисюк А.И. Исследование эффекта перемещения наночастиц под действием полей и зарядов, создаваемых сфокусированным электронным пучком // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 5. – С. 120–123.
6. Караев А.А., Денисюк А.И. Оптические антенны-зонды на основе металлических нанооболочек // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 4 (74). – С. 87–90.
7. Hamaker H.C. The London – van der Waals attraction between spherical particles // Physica. – 1937. – V. 4. – № 10. – P. 1058–1072.
8. Bergstrom L. Hamaker constants of inorganic materials // Adv. Coll. Interf. Sci. – 1997. – V. 70. – P. 126–169.

Денисюк Андрей Игоревич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, aidenisyuk@gmail.com

Комиссаренко Филипп Эдуардович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, 1576406@gmail.com

УДК 535.343.2, 539.213.27

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА PbSe КВАНТОВЫХ ТОЧЕК, СФОРМИРОВАННЫХ ВО ФТОРОФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ

Е.В. Колобкова, А.В. Полякова, А.Н. Абдршин, А.О. Трофимов, Н.В. Никоноров, В.А. Асеев

На основании анализа данных дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгеновской дифрактометрии и оптической спектроскопии рассмотрены особенности формирования квантовых точек PbSe во фторофосфатном стекле системы Na_2O-P_2O_5-Ga_2O_3-A1F_3-ZnO. Определены размеры синтезированных квантовых точек (4–9 нм). Для всех размеров квантовых точек наблюдалась интенсивная люминесценция в спектральной области 0,5–1,7 мкм. Сделано предположение, что полоса люминесценции с максимумом 575 нм, возникающая при малых временах термообработки, связана с люминесценцией кластеров $PbSe_n$ и Se_n , где n=2,3,4. Дальнейшее увеличение времени термообработки приводит к сдвигу максимума полосы люминесценции до 1500 нм.

Ключевые слова: квантовые точки, фторофосфатные стекла, PbSe, молекулярные кластеры.

Введение

В последние десятилетия стекла, содержащие квантовые точки (КТ), привлекают особое внимание для создания элементной базы фотоники. Раньше стекла с КТ использовались в качестве цветных светофильтров и насыщающихся поглотителей излучения. На сегодняшний день их возможные области применения существенно расширены и включают в себя люминесцентные маркеры, сенсоры и конвекторы широкого спектра излучения, люминофоры для белых светодиодов и т.д.

КТ PbSe характеризуются широким диапазоном размеров, соответствующих режиму сильного квантования, так как электрон, дырка и экситон имеют относительно большие радиусы экситона Бора. Так, в PbSe радиусы электрона, дырки и экситона Бора равны 23, 23 и 46 нм соответственно. Такие значения радиусов позволяют достигать режима сильного размерного квантования на сравнительно больших частицах.

В качестве матрицы для формирования КТ могут быть использованы жидкости (коллоидные растворы), органические полимеры и стекла. Коллоидные растворы демонстрируют высокой квантовый выход люминесценции и распределение КТ по размерам, близкое к монодисперсному [1]. Высокий квантовый выход 1s-1s перехода достигается за счет дополнительной пассивации поверхности КТ слоями более широкозонных полупроводников [2]. Несмотря на высокие оптические параметры, достигнутые на сформированных в коллоидных растворах и диспергированных в органическую полимерную матрицу КТ, существуют практические приложения, которые не могут быть реализованы на таких системах. К ним, прежде всего, относятся волоконные и планарные волноводы. Стекла являются оптимальной матрицей для вытяжки волокон или проведения ионного обмена при создании планарных волноводов.

Основой для практического использования КТ является радикальное изменение оптических свойств, возникающее вследствие квантового размерного эффекта, проявляющегося в диапазоне размеров, когда нанокристалл становится меньше радиуса экситона Бора. Именно такой нанокристалл называется КТ и имеет дискретный оптический спектр, причем дырка и электрон квантуются независимо друг от друга. В настоящее время практически отсутствуют сведения, за исключением работ [3–5], о формировании в стеклах полупроводниковых PbSe нанокристаллов, характеризующихся сдвигом края оптического поглощения в широком диапазоне длин волн и демонстрирующих квантовые переходы в спектре оптического поглощения. Данные о люминесценции квантовых точек, сформированных в стеклообразных матрицах, крайне скудны и ограничиваются работами [6, 7].

Целью представленного исследования являлось изучение изменения спектрально-люминесцентных характеристик КТ PbSe, сформированных во фторофосфатных стеклах в системе Na_2O-P_2O_5-Ga_2O_3-A1F_3-ZnO, при изменении их размеров.

Методика эксперимента и результаты исследований

В качестве образцов для исследования были выбраны стекла системы Na_2O-P_2O_5-Ga_2O_3-A1F_3-ZnO(Se)-PbF_2, для синтеза которых применялись материалы марки «ХЧ» и «ОСЧ». Вес навески составлял 50 г, синтез проводился в течение 40 мин при температуре T=950–1000°C в закрытых стеклоуглеродных тиглях в атмосфере аргона. Такие условия синтеза позволяли получать стекла с высоким уровнем пропускания в диапазоне 0,3–5 мкм. Стекломасса вырабатывалась между двумя холодными стеклоуглеродными пластинами, закаленные стекла имели толщину не более 2 мм и отжигались при температуре несколько ниже температуры стеклования T_g для снятия остаточных напряжений.

Характеристические температуры при выборе температурно-временного режима получения стеклокерамики были определены на основании данных, полученных при анализе кривой дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Исходные стекла и подвергнутые вторичной термообработке образцы стеклокерамики для измерения спектрально-люминесцентных характеристик были отшлифованы, отполированы и имели толщину 1 мм. Термограммы исследуемых образцов стекол регистрировались с помощью дифференциального сканирующего калориметра STA 449F1 Jupiter фирмы Nietzsche.

Спектры поглощения образцов снимались на спектрофотометре Varian Cary 500 в диапазоне 300–3300 нм (оптическая плотность D=0–10; разрешение 0,1 нм, время интеграции 0,5 с). Спектры люминесценции были измерены на волоконном спектрометре EPP2000-UVN-SR (StellarNet) с возбуждением люминесценции полупроводниковыми лазерами (λ = 409 и 980 нм). Рентгенофазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре общего назначения «Rigaku Ultima IV» с использованием CuK_{α}-излучения и детектором D/teX Ultra.

Теплофизические характеристики

Термограмма исследуемых стекол, перспективных для создания объемных стеклокристаллических материалов (прозрачных стеклокерамик), должна иметь два неперекрывающихся экзопика: первый должен соответствовать выделению в объеме стекла активной кристаллической фазы (например, PbSe), второй соответствует поверхностной кристаллизации. Выбор температуры термообработки в начале первого пика позволяет полностью исключить поверхностную кристаллизацию, которая приводит к неконтролируемому росту больших кристаллов.

Термограмма исследуемого стекла (рис. 1) демонстрирует два разделенных экзотермических пика. Первый пик, соответствующий выделению кубической модификации PbSe, находится при T=430–470°C (удельная энтальпия составила 3,7 Дж/г), второй соответствует кристаллизации $NaPO_3$. На основании ДСК был определен температурный режим для проведения направленной контролируемой кристаллизации.

Известно, что для оптимизации распределения КТ по размерам и приближении этого распределения к монодисперсному необходим двухстадийный режим термообработки, а для возможности контроля за ростом кристаллов необходимо выбирать минимальные T_1 и T_2 из температурного интервала [8]. Первая, низкотемпературная стадия (T_1) должна обеспечить рост определенного числа зародышей. Вторая стадия (T_2) должна приводить к росту нанокристаллов преимущественно определенного размера. Известно, что максимум скорости роста зародышей лежит вблизи температуры стеклования T_g, которая определяется как температура перегиба и составляет для данного стекла 380°C. Чтобы ограничить число зародышей кристаллизации, необходимо выбрать наименьшую T_1. В нашем исследовании была выбрана температура T_1=320°C, время формирования зародышей кристаллизации 60 мин и T_2=415°C. Стекла были обработаны при температуре T_2 в течение 20–120 мин.

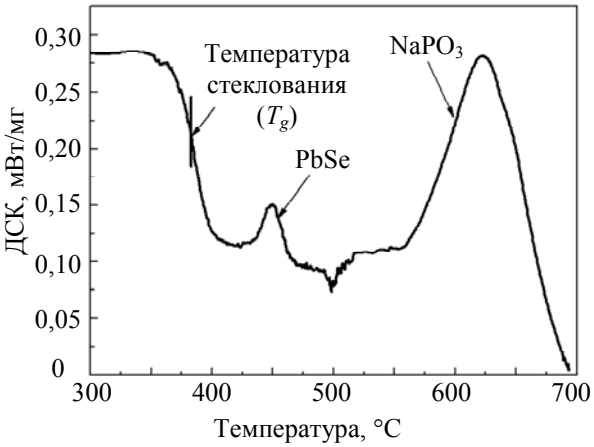


Рис. 1. Термограмма дифференциальной сканирующей колориметрии (ДСК) исходного стекла

Спектрально-люминесцентные исследования

Спектры поглощения для пяти времен термообработки (ТО) при T_2=415°C представлены на рис. 2. Видно, что при изменении времени от 20 мин до 120 мин происходит сдвиг края поглощения от 400 нм до 2100 нм. Такое изменение связано с формированием и ростом нанокристаллов. Наблюдаемый дискретный спектр характерен для квантовых точек и обусловлен возникновением дискретных переходов в квазиатоме, каковым является квантовая точка. Для первого времени термообработки не происходит возникновения дискретных полос, по-видимому, КТ в нем отсутствуют. При увеличении времени ТО до 40 мин возникает полоса с максимумом 1190 нм. Используя для расчета размеров формулу [9], получаем размеры (диаметр) синтезированных квантовых точек:

$$E_g(D) = E_g(\infty) + \frac{1}{0,0105 \times D^2 + 0,2655 \times D + 0,0667},$$

где D – эффективный диаметр квантовых точек, нм; $Eg(D)$ – энергия запрещенной зоны квантовой точки PbSe, эВ; $Eg(\infty)$ – энергия запрещенной зоны объемного полупроводника PbSe (0,29 эВ). Диаметр синтезированных квантовых точек составил 4,1; 5,2; 7,8 и 9,1 нм для времен ТО соответственно 40, 60, 90 и 120 мин.

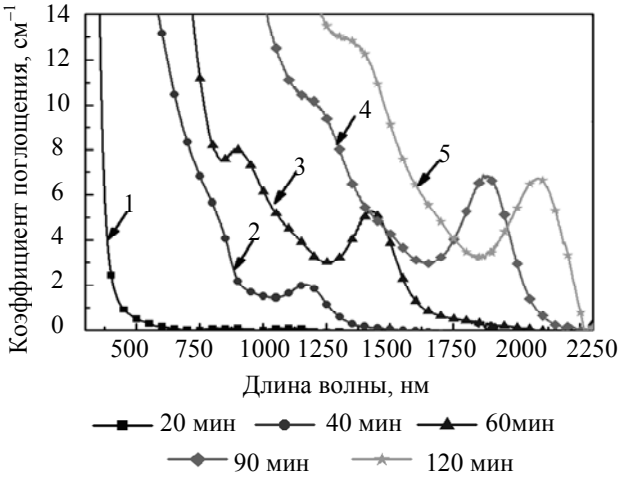


Рис. 2. Спектры поглощения для пяти времен термообработки (20, 40, 60, 90, 120 мин, образцы 1–5 соответственно) при T_2=415°С.

Сдвиг полосы поглощения, происходящий после термической обработки исходного стекла в течение 20 мин, требует дальнейшего уточнения. Для первого экситонного перехода были рассчитаны полуширины полос поглощения при изменении размера квантовых точек. Оказалось, что при увеличении размеров от 4,1 до 9,1 нм полуширина полосы, обусловленная частично неоднородным уширением, т.е. разбросом КТ по размерам, уменьшается от 1136 до 518 см$^{-1}$.

Для образцов стекол 1–5 (рис. 2) и дополнительно образца, подвернутого температурной обработке в течение 30 мин (образец 6) (рис. 3, а), были получены спектры люминесценции.

Измерения люминесценции показали следующие результаты. Люминесценция образцов 1 и 6 при возбуждении излучением лазерного диода с длиной волны 409 нм представлена на рис. 3, а. Для образца 1 с временем ТО 20 мин наблюдается одна сложная полоса с максимумом 575 нм. Данная полоса может быть связана с люминесценцией кластеров $PbSe_n$ и Se_n, где n=2,3,4.

Увеличение времени ТО до 30 мин приводит к сдвигу максимума люминесценции с 575 нм до 633 нм и возникновению полосы 1000 нм. Такое изменение спектра может быть связано с увеличением размеров кластеров (полоса с максимумом 575–633 нм) и появлением малой концентрации квантовых точек (полоса с максимумом 1000 нм). Следует отметить, что полосы имеют сложную структуру, в частности, полоса, обусловленная квантовыми точками, состоит из полос с максимумами 940, 970 и 1018 нм.

Для образцов 2–5 (рис. 2) люминесценции при возбуждении излучением лазерного диода с длиной волны 409 нм не наблюдается вследствие большого собственного поглощения на этой длине волны. Для образцов 2 и 3 люминесценция наблюдалась при возбуждении излучением лазерного диода с длиной волны 980 нм (рис. 3, б).

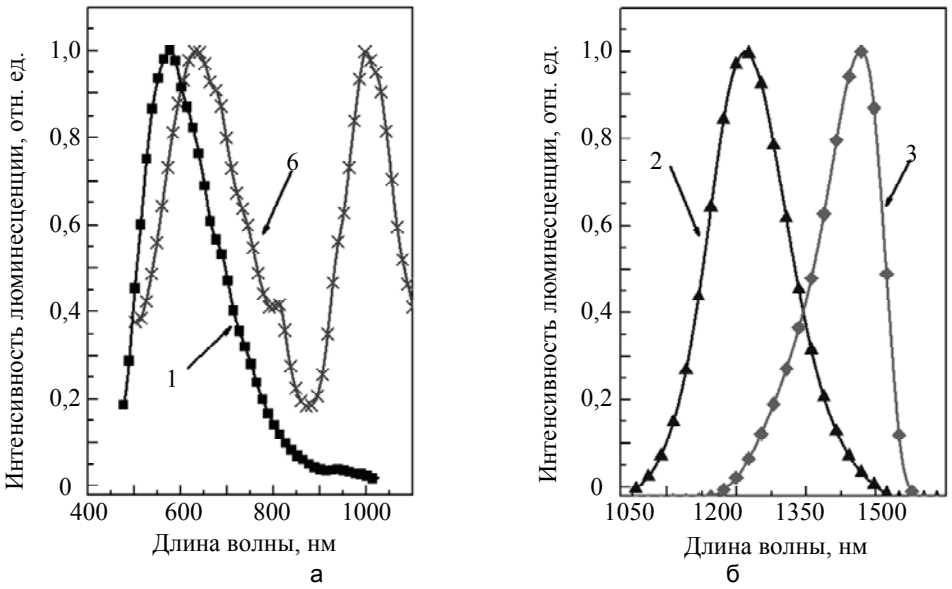


Рис. 3. Спектры люминесценции образцов 1 и 6 при возбуждении излучением лазерного диода с длиной волны 409 нм (а); спектры люминесценции квантовых точек в стеклах 2 и 3 при возбуждении лазерным диодом с длиной волны 980 нм (б)

Сопоставление спектров поглощения и люминесценции КТ приведено в таблице.

Номер образца	Время термообработки, мин	Средний диаметр КТ, нм	Максимум пика (переход 1*s*–1*s*)	Полуширина пика (переход 1*s*–1*s*), см$^{-1}$	Третий экситонный переход, нм	Максимум люминесценции, нм	Стоксовский сдвиг, см$^{-1}$
1	20	–	–	–	–	575	–
6	30	–	–	–	–	633, 1000	–
2	40	4,1	1179	1136	828	1347	1059
3	60	5,2	1429	1002	913	1595	728
4	90	7,8	1882	564	1401	–	–
5	120	9,1	2082	518	1333	–	–

Ввиду малой концентрации кристаллической фазы рентгеновская дифракция для образцов 1, 2, 3 и 4 не наблюдалась. В то же время для образца 5 рентгеновская дифракция хорошо регистрируется (рис. 4).

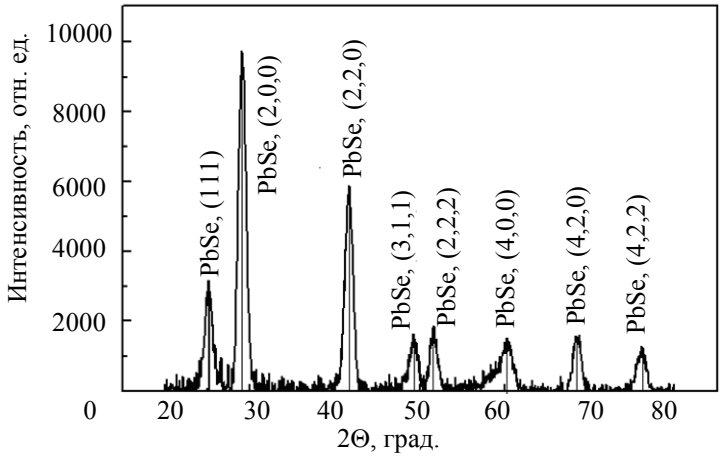


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма образца 5. Вертикальные линии указывают положение дифракционных максимумов объемного кристалла PbSe

Сопоставление положений дифракционных максимумов с табличными для кубической модификации PbSe показывает полное совпадение значений межплоскостных расстояний. Расчет по формуле Дебая–Шерера дает значение диаметра 9 нм, что хорошо согласуется с результатом, полученным из спектров поглощения.

Заключение

В работе были изучены оптические свойства квантовых точек PbSe, сформированных во фторофосфатных стеклах. Использование формулы, связывающей размеры нанокристаллов и энергию первого экситонного уровня, позволило оценить диапазон изменения размеров синтезированных квантовых точек (4–9 нм). Для всех размеров квантовых точек обнаружена интенсивная люминесценция в области от 500 нм до 1,7 мкм. На начальной стадии роста нанокристаллов наблюдается одна полоса люминесценции с максимумом 575 нм. Данная полоса может быть связана с формированием в стекле кластеров $PbSe_n$ и Se_n, где n=2,3,4. При увеличении времени термообработки реализуется промежуточная стадия, на которой присутствуют как кластеры, так и квантовые точки PbSe, характеризующиеся люминесценцией в области 1000 нм. Дальнейшее увеличение времени термообработки приводит к сдвигу максимума полосы люминесценции до 1700 нм. Данные рентгеновской дифракции подтверждают справедливость отнесения всех наблюдаемых оптических закономерностей к формированию и росту квантовых точек PbSe.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-1288 и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Соглашение № 14.B37.21.0169 Минобрнауки РФ).

Литература

1. Sashchiuk A., Langof L., Chaim R., Lifshitz E. Synthesis and characterization of PbSe and PbSe/PbS core-shell colloidal nanocrystals // J. of Crystal growth. – 2002. – V. 240. – P. 431–437.
2. Kovalenko M.V., Schaller R.D., Jarzab D. et al. Inorganically Functionalized PbS-CdS Colloidal Nanocrystals: Integration into Amorphous Chalcogenide Glass and Luminescent Properties // J. Am. Chem. Soc. – 2012. – V. 134. – № 5. – P. 2457–2460.

3. Kolobkova E.V., Petrikov V.D, Lipovskii A.A. PbSe quantum dot doped phosphate glass // Electronics Letters. – 1997. – V. 33. – № 1. – P. 101–102.
4. Lipovskii A.A., Kolobkova E.V., Petrikov V.D., Wise F. Synthesis and characterization of PdSe quantum dots in phosphate glasses // Appl. Phys. Letters. – 1997. – V. 71 – № 23. – P. 3406–3408.
5. Колобкова Е.В., Никоноров Н.В., Асеев В.А. Влияние серебра на рост квантовых точек во фторофосфатных стеклах// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 5 (81). – С. 1–4.
6. Jieun Chang, Chao Liu, Jong Heo. Optical properties of PbSe quantum dots doped in borosilicate glass // J. of Non-Cryst. Solids. – 2009. – V. 355. – P. 1897–1899.
7. Loiko P.A., Rachkovskaya G.E., Zaharevich G.D., GurinV.S., Gapjnenko, M.C., Yumashev K.V. Optical properties of novel PbS and PbSe quantum dot-doped alumino-alkzli-silicate glasses // J. Non-Cryst. Solids. – 2012. – V. 358. – P. 1840–1845.
8. Сборник трудов X Международной Конференции «Прикладная оптика–2012». – СПб, 2012. – Т. 2. – С. 170–174.
9. Allan G., Delerue C. Confinement effects in PbSe quantum well and nanocrystal // Phys. Rev. B. – 2004. – V. 70. – № 24. – P. 245321.

Колобкова Елена Вячеславовна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, доцент, Kolobok106@rambler.ru

Полякова Александра Валерьевна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, avpoliakova@bk.ru

Абдршин Альберт Наильевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, avpoliakova@bk.ru

Трофимов Александр Олегович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Exeptional777@mail.ru

Никоноров Николай Валентинович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, Nikonorov@oi.ifmo.ru

Асеев Владимир Анатольевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ассистент, Aseev@oi.ifmo.ru

УДК 539.26+620.179.152.1

САМООРГАНИЗАЦИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СУЛЬФИДА СВИНЦА РАЗНОГО РАЗМЕРА

Е.В. Ушакова, В.В. Голубков, А.П. Литвин, П.С. Парфенов, А.В. Баранов

Исследован процесс самоорганизации полупроводниковых наночастиц сульфида свинца, люминесцирующих в спектральной области 0,8–2 мкм. Соответствующие диаметры наночастиц, вычисленные с помощью рентгенофазового анализа, составляли 2,5–8 нм. Наноструктуры получены в результате нанесения наночастиц сульфида свинца на стеклянную подложку и внедрением в пористую матрицу. Процессы самоорганизации наночастиц на подложке и в матрице исследованы методами рентгеновского структурного анализа. Показано, что самоорганизованные наноструктуры представляют собой упорядоченные структуры из плотноупакованных наночастиц. Формирование пространственного упорядочения наночастиц приводит к появлению характерных максимумов в угловой зависимости рентгеновского рассеяния, положение которых определяется периодом упорядоченной структуры. Обнаружено, что вид этой упорядоченности не зависит от размера наночастиц и типа подложки и матрицы. Показано, что расстояние между центрами наночастиц в полученных структурах линейно зависит от их диаметра, а среднее значение коэффициента наклона размерной зависимости составляет 1,2±0,1.

Ключевые слова: квантовая точка, наночастица, сверхрешетка, рентгеновский структурный анализ, сульфид свинца.

Введение

Монодисперсные коллоидные наночастицы (НЧ) могут самостоятельно собираться в упорядоченные массивы, так называемые сверхрешетки (СР) [1]. Такие структуры были получены из металлических, магнитных, полупроводниковых [1, 2] нанокристаллов, а также их бинарных смесей [3]. Сборка наночастиц в периодически упорядоченные сверхрешетки привела к созданию нового класса функциональных материалов, которые не только обладают и усиливают квантоворазмерные эффекты самих НЧ, но и проявляют «коллективные» свойства [2]. В настоящее время практическое применение таких материалов

ограничено из-за отсутствия крупномасштабного производства и контроля качества собранной структуры СР. Сборка наночастиц в сверхрешетки с управляемой структурой требует глубокого понимания механизмов зарождения таких суперкристаллов и взаимодействия между различными его структурами. Установление фундаментальных принципов, которые регулируют процесс самосборки НЧ в одно- и многокомпонентные СР, является критически важным для создания и усовершенствования устройств на основе НЧ, таких как светодиоды [4], солнечные батареи, фотоприемники и термоэлектрические преобразователи.

Многие особенности, присущие обычным кристаллам (трансляционная симметрия, дефекты и т.д.), обнаружены и в СР, зарождение и рост которых предположительно подчиняется тем же фундаментальным принципам кристаллизации. В отличие от отдельных атомов и молекул, которые трудно «изобразить» в реальном пространстве, НЧ и их сверхструктуры могут быть изучены в мельчайших подробностях с использованием обычных методов электронной микроскопии. В связи с этим исследование самосборки НЧ может помочь в изучении общих аспектов кристаллизации и структуры поверхности в реальном пространстве с помощью различных методов визуализации [3].

Несмотря на интенсивные исследования, до сих пор материалы на основе самоорганизующихся СР или суперкристаллов еще далеки от применений. Прогресс в области формирования подходящих тест-структур и последующее развитие технологий, основанных на СР из НЧ, сдерживаются из-за ограниченного контроля над параметрами решетки, такими как расстояние между НЧ и симметрия полученного суперкристалла. В связи с этим исследование процессов самоорганизации НЧ в упорядоченные ансамбли и их зависимости от различных факторов (например, тип подложки, растворитель, температура и др.) является в настоящее время актуальным.

В работе были исследованы структуры, получающиеся в процессе самоорганизации наночастиц – квантовых точек (КТ) сульфида свинца (PbS) разных размеров, нанесенных на стеклянную подложку или внедренных в пористую органическую матрицу.

Приготовление образцов

Для изготовления НЧ был применен высокотемпературный органометаллический синтез в органическом растворе – метод горячей инжекции. Общим подходом в таком методе синтеза наночастиц халькогенидов свинца является использование реакции между солями свинца (с олеиновой и лауриновой кислотами) и металлоорганическими реагентами серы (комплексы серы с октадаценом, олеиламином или триоктилфосфином). В качестве реакционной среды использовались смеси октадецена, олеиламина и триоктилфосфиноксида. Реакция проводилась при температуре 70–170ºС в атмосфере аргона с использованием стандартного химического оборудования для работы в инертной атмосфере, включая вакуумную сушку. В качестве растворителя для дальнейших исследований использовался четыреххлористый углерод. В результате проведенного синтеза были получены образцы квантовых точек PbS, люминесцирующих в спектральной области 0,8–2 мкм.

Обычно плотноупакованные системы квантовых точек приготавливают путем высушивания капли раствора КТ на подложке [5]. Именно этот способ использован авторами для приготовления образцов PbS КТ на стеклянной подложке. Стоковый раствор квантовых точек с концентрацией около 10^{-6} М капался на покровное стекло несколько раз, капля высыхала в нейтральной атмосфере при комнатной температуре, образуя достаточно концентрированную пленку.

Недостатком метода высушивания капли на подложке является неоднородность в распределении КТ по объему пленки, что уменьшает точность определений [6]. В работе [6] показано, что для создания образцов плотноупакованных КТ с высокой однородностью можно использовать пористую органическую матрицу, пропитанную раствором КТ необходимых размеров и высушенную в нейтральной атмосфере при комнатной температуре. В качестве тонкослойной пористой матрицы была использована широкопористая фильтровальная бумага марки Filtrak 388 (Grade Sartorius) толщиной 150 мкм. Для внедрения PbS КТ в матрицу приготавливались растворы КТ с необходимой концентрацией в области 10^{-5}–10^{-6} М, далее полоска фильтровальной бумаги погружалась в 100 мкл полученного раствора в течение минуты и сушилась в нейтральной атмосфере при комнатной температуре.

Описание экспериментальных методов исследования образцов PbS КТ

Для исследования неоднородностей нанометрового масштаба, включая определение размеров НЧ, а также их взаимное расположение на подложке и в объеме пористой матрицы, использованы хорошо себя зарекомендовавшие методы рентгеновского структурного анализа – рентгенофазовый анализ (РФА) и рассеяние рентгеновских лучей под малыми углами (РМУ) [7]. Размеры PbS КТ были определены методом РФА с помощью дифрактометра «Ultima IV, Rigaku» с излучением FeK_{α} с длиной волны 1,5405 Å. Полученные зависимости интенсивности рассеяния рентгеновских лучей от двойного угла рассеяния приведены на рис. 1.

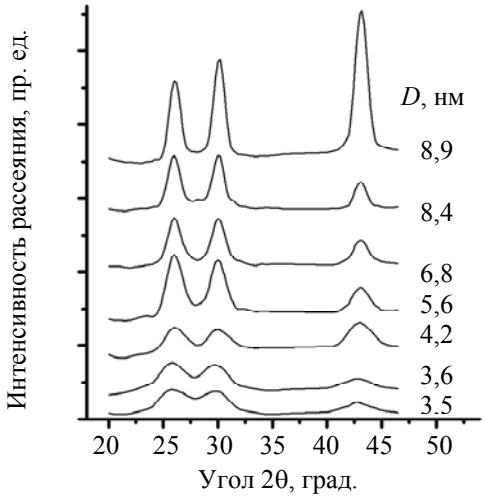


Рис. 1. Полученные дифрактограммы образцов PbS КТ разного размера *D*, нанесенных на стеклянную подложку

По положению и ширине пиков на дифрактограмме можно рассчитать размеры наночастиц по формуле Шерера [7]:

$$D = \frac{k\lambda}{\cos\theta \cdot (\Delta 2\theta)}, \quad (1)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения; (Δ2θ) – ширина отражения на половине высоты в радианах; *k* – константа. Рассчитанные таким образом размеры НЧ совпадали с размерами, полученными из спектрального положения пика длинноволновой полосы поглощения PbS наночастиц [8], измеренного с использованием спектрофотометра Shimadzu.

Для исследования упорядоченности структур, получаемых путем осаждения на стеклянную подложку или внедрением в органическую матрицу PbS КТ, использовался метод РМУ [3]. Угловые зависимости интенсивности рентгеновского рассеяния измерялись в диапазоне углов 6–200 угл. мин. на малоугловой рентгеновской установке с использованием CuK_{α}-излучения и Ni-фильтра. Измерения проводились в геометрии бесконечно высокого пучка.

Результаты и обсуждение

Спонтанная самосборка сферических НЧ достаточно хорошо исследована [5, 9, 10]. На ранней стадии формирования суперкристалла НЧ агрегируют случайным образом и образуют аморфную структуру с упорядочиванием на малом расстоянии. Затем частицы кристаллизуются в упорядоченные структуры в виде СР, уменьшая общую свободную энергию. В первом приближении сферические НЧ ведут себя при упаковке как твердые шары, однако при зарождении и росте реального сверхкристалла происходит множество сложных процессов. Они зависят от взаимодействия поверхностных лигандов с окружающим растворителем, скорости испарения растворителя, типа матрицы и подложки, а также от температуры, давления и других факторов [5]. В данной работе с использованием техники РМУ исследована морфология структур, полученных в результате самоорганизации НЧ из раствора в пористой матрице и на стеклянной подложке.

На рис. 2 для сравнения приведены типичные зависимости интенсивности рассеяния рентгеновского излучения от угла рассеяния для нанокристаллов PbS с размером 8,3 нм в растворе, в пористой матрице и на стеклянной подложке. В случае коллоидного раствора изолированных наночастиц угловая зависимость РМУ определяется концентрацией НЧ и форм-фактором $F(q)$, зависящим от формы и размера рассеивающей частицы [11], что приводит к модуляции зависимости с первым максимумом при нулевом угле рассеяния (рис. 2, штриховая кривая). При большой концентрации наночастиц угловая зависимость РМУ будет дополнительно промодулирована в результате интерференции сигналов рассеяния от близкорасположенных частиц в образце. В случае пространственного упорядочения частиц в угловой зависимости возникают характерные максимумы, положение которых определяется периодом упорядоченной структуры [2]. Появление таких максимумов при угле рассеяния около 2 град. хорошо видно на рис. 2 для квантовых точек на стеклянной подложке и в матрице.

Максимум на кривых РМУ появляется в результате интерференции рассеянного на НЧ рентгеновского излучения, и его появление означает, что НЧ располагаются упорядоченно в образовавшейся структуре. Наши измерения показали, что возникновение максимумов в сигнале РМУ характерно для квантовых точек PbS любых размеров. Это иллюстрируется на рис. 3, где приведены типичные зависи-

мости интенсивности рассеяния рентгеновского излучения для образцов НЧ разных размеров, нанесенных на стеклянную подложку (рис. 3, а) и внедренных в пористую матрицу (рис. 3, б).

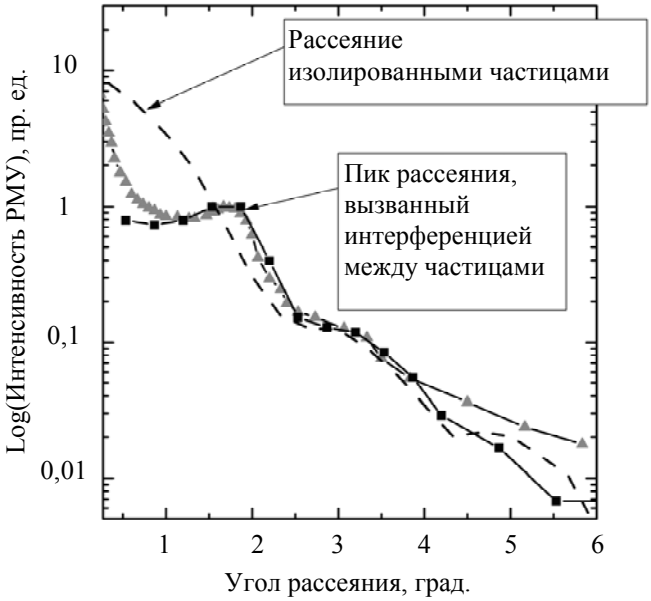


Рис. 2. Зависимость интенсивности рассеяния рентгеновского излучения от угла рассеяния квантовыми точками PbS диаметром 8,3 нм: КТ в растворе тетрахлорметана (- - -), КТ, внедренные в матрицу (▲), КТ, нанесенные на стекло (■)

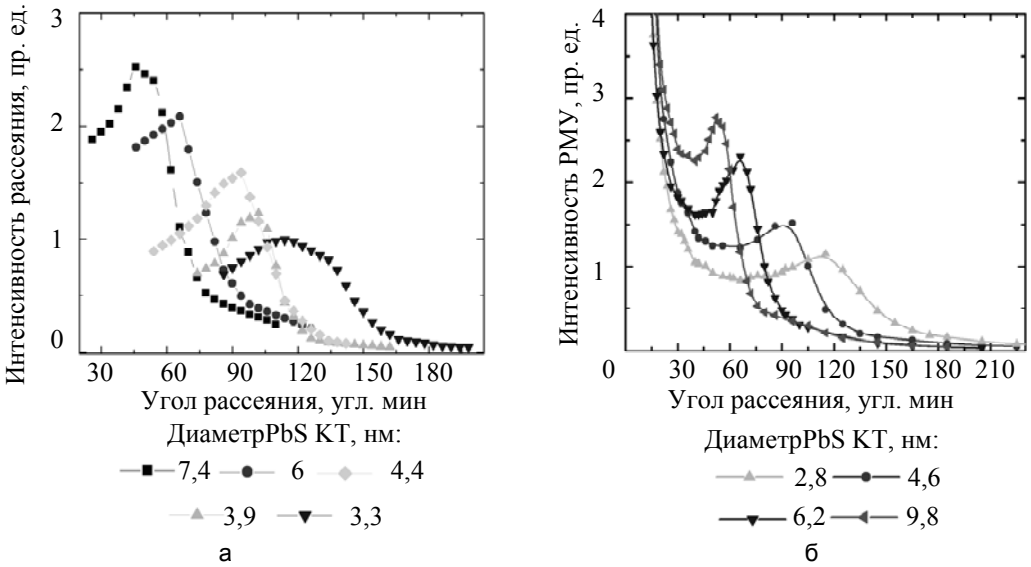


Рис. 3. Зависимость интенсивности рассеяния от угла рассеяния для PbS КТ разных размеров: нанесенных на стеклянную подложку (а), внедренных в пористую матрицу (б)

Видно, что положение максимума рассеяния рентгеновских лучей зависит от размера наночастиц: чем меньше их размер, тем при больших углах наблюдается пик рассеяния. Такая зависимость характерна для плотной упорядоченной упаковки шаров, в которой период структуры, а значит, и угловое положение максимума рассеяния определяются диаметром шаров. В самом простом приближении расстояние между центрами квантовых точек в плотной упаковке можно было бы оценить, используя формулу для дифракции света на периодической решетке:

$$d = m\lambda / \sin\varphi_m ,$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения (1,54 Å); φ_m – угол, при котором наблюдается максимум рассеяния рентгеновских лучей; m – числовой коэффициент. Однако данная формула не подходит для описания упорядоченных структур из наночастиц, что было показано для квантовых точек селенида кадмия (CdSe) [2], поскольку положение максимума рассеяния определяется не только интерференцией, вызванной взаимным расположением наночастиц, но и собственным рассеянием от каждой наночастицы.

Для описания систем плотноупакованных частиц больше подходит формула, выведенная в [12] и связывающая расстояние между центрами рассеивающих частиц и углом, под которым наблюдается максимум φ_m:

$$L = 4,22 \cdot 10^{-3} / \varphi_m , \quad (2)$$

где L – расстояние между частицами в Å. На рис. 4 приведено сопоставление рассчитанных расстояний между центрами PbS КТ, нанесенных на стекло и внедренных в матрицу, полученного с использованием формулы (2) из данных РМУ, с диаметрами квантовых точек, полученными из данных РФА (по формуле (1)).

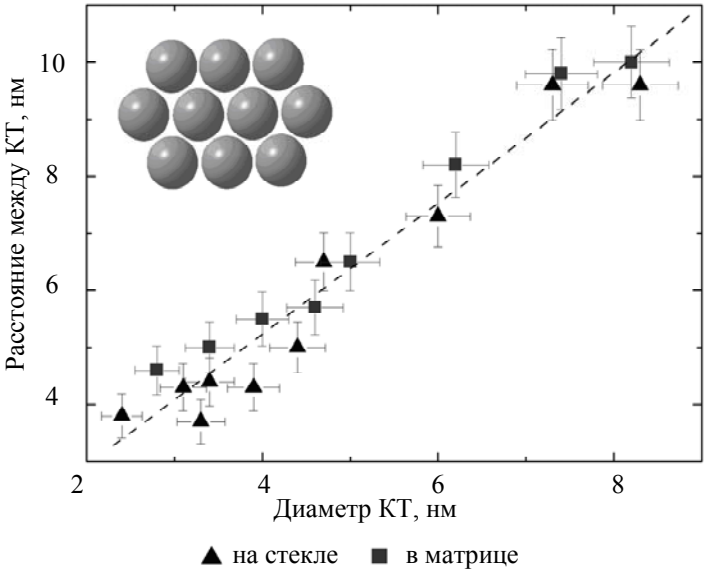


Рис. 4. Сопоставление расстояний между центрами PbS КТ на стеклянной подложке и в пористой матрице, рассчитанных по формуле (2), с диаметрами КТ, рассчитанными по формуле (1). На вставке схематично показана получаемая упорядоченная структура из КТ

Видно, что расстояние между центрами КТ в полученных структурах линейно зависит от их диаметра. Это указывает на то, что при нанесении PbS КТ на стеклянную подложку и внедрении их в пористую матрицу формируется упорядоченная структура плотноупакованных наночастиц. Среднее значение коэффициента наклона размерной зависимости составляет 1,2±0,1, в то время как для плотной упаковки наночастиц одного размера ожидается его значение, равное единице. Наблюдающееся небольшое различие связано с тем, что на поверхности КТ находится слой лигандов с толщиной около 0,7 нм, который препятствует непосредственному контакту наночастиц. На вставке рис. 4 схематично показана упорядоченная структура плотно упакованных PbS КТ.

Заключение

Полученные данные позволяют сделать вывод, что наноструктуры, полученные в результате нанесения капли раствора квантовых точек PbS на стеклянную подложку или внедрения раствора квантовых точек в пористую матрицу, представляют собой упорядоченные структуры из плотноупакованных наночастиц, причем вид этой упорядоченности не зависит от размера наночастиц и типа подложки и матрицы. Однако определить являются ли они аморфной плотной упаковкой, так называемой «glassy solids», или «quantum dot solids», аналогичной полученной для CdSe квантовых точек на стекле [2], или образуются двух- или трехмерные суперкристаллы из квантовых точек PbS на данном этапе работы не представляется возможным. Для ответа на этот вопрос необходимы доказательства наличия дальнего порядка в формируемых упорядоченных структурах. Полученные данные о структурах плотноупакованных квантовых точек PbS представляют существенный интерес для разработки элементов солнечных батарей на основе тонких слоев квантовых точек халькогенидов свинца, поглощающих свет в прозрачной для кремниевых элементов ближней инфракрасной области спектра.

Авторы благодарят Минобрнауки РФ (Проекты 11.519.11.3026 и 14.B25.31.0002) за частичную финансовую поддержку работы.

Литература

1. Nie Z., Petukhova A., Kumacheva E. Properties and emerging applications of self-assembled structures made from inorganic nanoparticles // Nature nanotechnology. – 2009. – V. 5. – № 1. – P. 15–25.

2. Murray C.B., Kagan C.R., Bawendi M.G. Synthesis and characterization of monodisperse nanocrystals and close-packed nanocrystal assemblies // Annual Review of Materials Science. – 2000. – V. 30. – № 1. – P. 545–610.
3. Corricelli M. et al. Self-organization of mono-and bi-modal PbS nanocrystal populations in superlattices // CrystEngComm. – 2011. – V. 13. – № 12. – P. 3988–3997.
4. Coe S., Woo W.K., Moungi Bawendi V.B. Electroluminescence from single monolayers of nanocrystals in molecular organic devices // Nature. – 2002. – V. 420. – № 6917. – P. 800–803.
5. Wang Z. et al. Correlating Superlattice Polymorphs to Internanoparticle Distance, Packing Density, and Surface Lattice in Assemblies of PbS Nanoparticles // Nano letters. – 2013. – V. 13. – № 3. – P. 1303–1311.
6. Litvin A.P. et al. PbS Quantum Dots in a Porous Matrix: Optical Characterization // The Journal of Physical Chemistry C. – 2013. – V. 117. – № 23. – P. 12318–12324.
7. Свергун Д.И., Фейгин Л.А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. – М.: Наука, 1986. – 279 с.
8. Ushakova E.V., Artemyev M.V., Muhina M.V., Parfenov P.S., Cherevkov S.A., Baranov A.V., Fedorov A.V. Investigation of the size dependent optical properties of PbS quantum dots //Proc. 14th Int. Conf. «Laser Optics 2010», St. Petersburg, Russia, June 28–July 02, 2010. – СПб: РИЦ ГУАП, 2010. – P. ThR6-p11.
9. Baimuratov A.S., Rukhlenko I.D., Turkov V.K., Baranov A.V., Fedorov A.V. Quantum-dot supercrystals for future nanophotonics //Scientific Reports. – 2013. – V. 3. – P. 1727.
10. Baimuratov A.S., Rukhlenko I.D., Fedorov A.V. Engineering band structure in nanoscale quantum-dot supercrystals // Optics Letters – V. 38. – № 13. – P. 2259–2261.
11. Porod G., Glatter O., Kratky O. Small Angle X-ray Scattering. – London: Academic Press, 1982. – 515 p.
12. Guinier A., Fournet G. Small-angle scattering of X-rays. – New-York, London: Jahn Willey-Champan, 1955. – 268 p.

Ушакова Елена Владимировна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, мл. научный сотрудник, el.ushakova@gmail.com

Голубков Валерий Викторович – Россия, Санкт-Петербург, Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН, доктор химических наук, ст. научный сотрудник, зав. лабораторией, golubkov@isc1.nw.ru

Литвин Александр Петрович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, инженер, litvin88@gmail.com

Парфенов Петр Сергеевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, qrspeter@pochta.ru

Баранов Александр Васильевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, a_v_baranov@yahoo.com

8 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.421.2

ЛОКАЛЬНАЯ МИНИМИЗАЦИЯ ЧИСЛА МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

С.Ю. Лузин, С.И. Попов, Ю.И. Попов

Предложен алгоритм локальной минимизации числа межслойных переходов на многослойной печатной плате. Подход, основанный на анализе топологии окрестностей пары смежных переходов, учитывает возможности перекладки проводников, препятствующих переносу конкретного проводника на конкретный слой. Случаи, когда переходы не являются смежными (на пути от одного перехода к другому есть планарный контакт или точка ветвления без перехода), сведены к случаю смежных переходов. Проанализированы некоторые недостатки последовательной прокладки проводников и методов минимизации числа межслойных переходов, основанных на переносе фрагментов проводника на другой слой. Алгоритм реализован и внедрен в российскую систему автоматизированного проектирования TopoR. В работе приведены результаты сравнения трассировки нескольких печатных плат с использованием алгоритма и без него. На тестовых примерах многослойных печатных плат использование предложенного алгоритма позволило дополнительно на 3–11% уменьшить число межслойных переходов.

Ключевые слова: САПР, автоматическая трассировка, TopoR, минимизация числа межслойных переходов.

Введение

В большинстве систем автоматизированного проектирования печатного монтажа задача автоматической трассировки межсоединений сводится к задаче последовательного поиска путей между парами точек в «лабиринте», образованном контактами, запретами и уже проложенными проводниками, при этом найденный путь фиксируется и становится частью лабиринта.

Главный недостаток последовательной прокладки проводников – сильная зависимость результата от порядка, в котором выбираются проводники. Основным механизмом оптимизации разводки является последовательная перекладка отдельных проводников – поочередное удаление и проведение их более дешевыми путями (или старым путем, если более дешевого пути не нашлось). Под стоимостью пути здесь понимается интегральный критерий, учитывающий различные факторы (длину проводника, количество переходов проводника со слоя на слой, количество нарушений проектных норм и т.д.): $S = \sum k_i x_i$, где S – стоимость пути, x_i – величина i-го фактора, k_i – коэффициент при факторе, $k_i x_i$ – штраф за величину фактора, $\sum k_i = 1$.

К сожалению, эффективная функция стоимости может быть различна не только для разных плат, но даже и для разных областей одной платы, поэтому надежда на то, что удастся подобрать идеальные коэффициенты, несбыточна.

Проблема «застревания» в локальном минимуме, когда качество разводки еще далеко от идеального, но никакая перекладка одиночного проводника не может улучшить качество разводки, стоит очень остро во всех системах автоматизированного проектирования (САПР), использующих последовательную оптимизацию. В САПР TopoR [1, 2] при трассировке печатных плат все трассы предварительно прокладываются в одной плоскости (совмещенная топология), а затем решается задача расслоения с минимизацией числа межслойных переходов. Эффективный алгоритм решения этой задачи для случая двух слоев приведен в работе [3]. В ней строится граф доменов. В графе вершины (домены) соответствуют точкам пересечения пары проводников, а ребра – участкам проводников между точками пересечения. Граф является планарным. Пусть n – число вершин в графе, m – число ребер в графе. В работе приведены правила редукции графа доменов, которые за $O(n + m)$ позволяют сильно уменьшить его размер (на практике – до одной вершины). Далее обратным преобразованием (также за линейное время) граф доменов восстанавливается. В процессе восстановления находится наибольший отрицательный разрез, соответствующий минимальному необходимому числу межслойных переходов. В результате также становится известно, на каком именно отрезке какого проводника необходимо поставить переход.

В основе метода из [3], как и других методов минимизации числа межслойных переходов, лежит перенос фрагментов проводника на другой слой. Однако данный алгоритм, как и другие (например, [4]), не учитывает возможности изменения топологии проводников и дополнительного сокращения числа переходов соответственно.

На основе анализа топологической ситуации на отдельном участке платы можно решать ряд задач локальной оптимизация топологии проводников: устранять «клинчи» проводников [5], петли и полупетли на многослойных платах. В настоящей работе предложен алгоритм локальной минимизации числа межслойных переходов на многослойной плате, основанный на анализе топологии окрестностей пары смежных переходов.

Алгоритм локальной минимизации числа переходов

Если в цепи имеются смежные переходы *v* и *u* и длина соединяющего их проводника менее заданной (например, 10 мм), следует:

1. получить списки L_v и L_u слоев, на которых расположены проводники, инцидентные *v* и *u* соответственно, исключая проводник, соединяющий *v* и *u*;
2. получить список L_{cross} слоев, на которых расположены проводники, пересекающие (на совмещенной топологии) проводник в пути, соединяющем *v* и *u*;
3. если $L_{cross} \cap (L_v \cap L_u) \neq \varnothing$ (локальная оптимизация невозможна), перейти к следующей паре смежных переходов;
4. определить, можно ли скопировать проводник, соединяющий *v* и *u*, на все слои L_v и L_u;
5. если невозможно скопировать ни на L_v, ни на L_u, перейти к следующей паре смежных переходов;
6. иначе, если возможно скопировать и на L_v и на L_u, то выбрать тот переход (*v*), для которого $|L_v \cap L_{cross}| \leq |L_u \cap L_{cross}|$;
7. иначе выбрать переход (*v*), для которого возможно скопировать проводник (на L_v);
8. если $L_v \cap L_{cross} \neq \varnothing$ (рис. 1):
   - 8.1. в слоях $L_v \cap L_{cross}$ завести за *u* проводники, пересекающие проводник, соединяющий *v* и *u*;
   - 8.2. если диапазон слоев перехода *u* не содержит какие-либо слои из L_v, сменить тип перехода *u* на тип, содержащий $L_v \cup L_u$;
   - 8.3. скопировать проводник, соединяющий *v* и *u*, на слои L_v;
9. удалить исходный проводник, соединяющий *v* и *u*;
10. удалить переход *v*;
11. перейти к следующей паре смежных переходов.

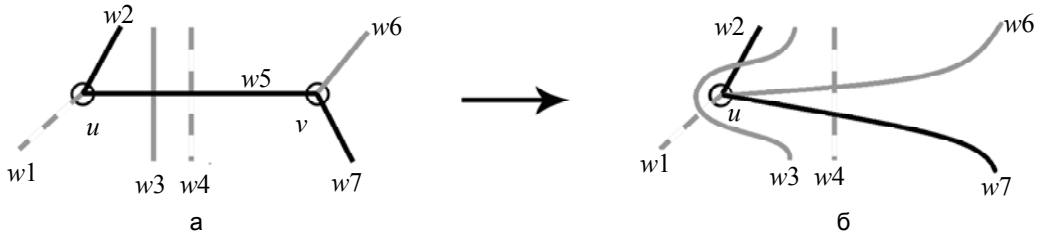


Рис. 1. Устранение лишнего перехода: топология до устранения перехода (а); топология после устранения перехода (б). Проводники серого (*w*3, *w*6), черного цветов (*w*2, *w*5, *w*7) и проводники, представленные штриховой линией (*w*1, *w*4), находятся на трех разных слоях соответственно. *u*, *v* – переходы

Расширение алгоритма для случая несмежных переходов

Приведенный выше алгоритм анализирует топологическую ситуацию в окрестности пары смежных межслойных переходов. В некоторых случаях избыточные межслойные переходы не являются смежными (на пути от одного перехода к другому есть планарный контакт или точка ветвления без перехода). Ниже показано, как свести эти случаи к уже рассмотренному, в котором переходы являются смежными.

Если путь от одного перехода до другого включает планарный контакт, один из проводников, инцидентных контакту, отключается от контакта и подключается к другому проводнику, инцидентному контакту, при этом создается точка ветвления (рис. 2).

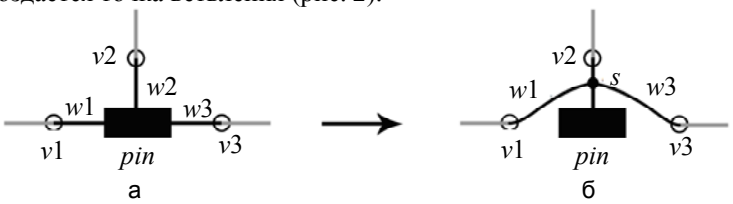


Рис. 2. Замена трех подключений к планарному контакту на одно: три проводника подключены к планарному контакту (а); добавлена точка ветвления (б). *w*1, *w*2, *w*3 – проводники; *v*1, *v*2, *v*3 – переходы; *s* – точка ветвления; *pin* – контакт

Если путь от одного перехода до другого включает точки ветвления проводников, дублируется путь от каждой точки ветвления до ближайшего перехода. В этом случае переходы станут смежными. Затем устраняются точки ветвления. Пример с одной точкой ветвления показан на рис. 3.

Впоследствии местоположение переходов корректируется силовым алгоритмом (величина и направление сил зависит от проводников в окрестности переходов) [6].

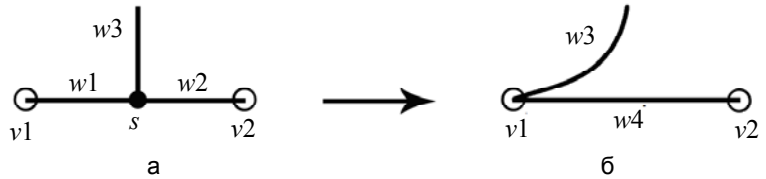


Рис. 3. Дублирование пути между переходом и точкой ветвления: переходы несмежные из-за точки ветвления (а); переходы стали смежными (б). *w*1, *w*2, *w*3 – проводники; *v*1, *v*2 – переходы; *s* – точка ветвления

Практическое применение

Рассмотренный выше алгоритм вместе с его расширением для несмежных переходов реализован и внедрен в российскую САПР TopoR. Экспериментальные результаты для нескольких печатных плат, разведенных с помощью САПР TopoR без использования и с использованием алгоритма локальной минимизации, приведены в таблице.

Параметр	Имя печатной платы			
	ARZ	ARM	BOARD3	TRASS
Количество компонентов	141	139	253	520
Количество контактов	762	798	2588	3933
Количество цепей	121	187	548	758
Количество слоев	4	4	4	4
Количество межслойных переходов при использовании только одиночной перекладки проводников и алгоритма [3]	243	220	1297	1898
Количество межслойных переходов с использованием локальной минимизации	215	203	1259	1702
Разница в числе межслойных переходов	28	17	38	196
Уменьшение числа переходов в %	11,5	7,7	2,9	10,3

Таблица. Экспериментальные результаты применения алгоритма локальной минимизации числа межслойных переходов

Как видно из приведенных результатов, алгоритм позволяет получить дополнительное сокращение числа межслойных переходов на многослойных печатных платах. Эффективность предложенного алгоритма существенно зависит от доли многоконтактных цепей на конкретной плате.

Заключение

Описан алгоритм локальной минимизации числа межслойных переходов. На тестовых примерах многослойных плат использование алгоритма локальной минимизации числа переходов позволило дополнительно на 3–11% уменьшить число межслойных переходов. Уменьшение числа межслойных переходов позволяет сократить стоимость изготовления печатной платы, высвободить место на плате для прокладки других трасс.

Литература

1. Luzin S., Polubasov O. Advantages of Isotropic PCB Routing // Printed Circuit Design & Fab. – 2009. – № 6. – P. 38–40.
2. Polubasov O. Routing Concepts of a Topological Router CAD System // Onboard Technology. – 2011. – № 5. – P. 11–15.
3. Полубасов О.Б. Глобальная минимизация количества межслойных переходов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 2. – С. 3–9.
4. The Khe-Sing, Wong D.F. and Cong Jingsheng. A Layout Modification Approach to Via Minimization // IEEE Trans. Computer-Aided Design. – Apr. 1991. – V. 10. – № 4. – P. 536–541.
5. Лузин С.Ю., Попов С.И., Попов Ю.И. Автоматизация устранения клинчей в топологии печатного монтажа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С. 116–121.

6. Лузин С.Ю., Лячек Ю.Т., Петросян Г.С., Полубасов О.Б. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – 224 с.

Лузин Сергей Юрьевич – Россия, Санкт-Петербург, ООО «ЭРЕМЕКС», доктор технических наук, технический директор, luzin@eremex.com

Попов Сергей Игоревич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант; ООО «ЭРЕМЕКС», инженер-программист; sergey.popove@yandex.ru

Попов Юрий Игоревич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант; ООО «ЭРЕМЕКС», инженер-программист; yurpopov@rambler.ru

УДК.629.7.05

ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ И ОТОБРАЖЕНИЯ МАССИВА ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ НА ЭКРАН СРЕДСТВ БОРТОВОЙ ИНДИКАЦИИ

П.П. Парамонов, М.О. Костишин, И.О. Жаринов, В.А. Нечаев, С.А. Сударчиков

Рассматривается проблема создания автоматизированного рабочего места подготовки, хранения и загрузки геоинформационных данных и полетного задания в бортовую систему картографической информации. Анализируются принципы формирования геоинформационных данных, предлагается унифицированный формат хранения данных и команд, составляющих в совокупности массив картографической информации. Приводится описание программного компонента, входящего в состав рабочего места. Предлагается новая структура бортовой системы картографической информации, отличающейся интегрированным в единый моноблок конструктивным исполнением. Предложенные в работе технические решения апробированы на практике.

Ключевые слова: геоинформационный ресурс, цифровой массив данных, отображение.

Введение

Непрерывный рост интенсивности воздушного движения определяет потребности общества в поиске новых способов представления пилотажно-навигационной информации на борту современных летательных аппаратов (ЛА). Перспективным направлением развития авиационного оборудования является подход [1] на основе отображения геоинформационных данных на средствах бортовой индикации. Геоинформационные данные представляют собой совокупность топогеодезических, аэронавигационных, гидрометеорологических, оперативно-тактических данных и некоторых других видов данных.

Топогеодезические данные содержат информацию об основных элементах ландшафта местности, таких как рельеф, населенные пункты, дороги, растительный покров, промышленные и социально-культурные сооружения и т.п. Аэронавигационные данные включают информацию о воздушных трассах, аэродромах и их оборудованию, об опасных и ограничительных зонах полета и т.п. Гидрометеорологические данные включают информацию о погодных условиях над территорией полета, гидрометеорологические наблюдения, сведения об опасных гидрометеорологических процессах и явлениях и т.п. Оперативно-тактические данные включают тактические особенности различных районов, зданий, сооружений и т.п., отображаемые при выполнении специальных задач.

Для работы с геоинформационными данными на борту ЛА в состав бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) должна входить специализированная бортовая система картографической информации (БСКИ), предназначенная для хранения и вывода на средства бортовой индикации геоинформационного массива данных [2]. В настоящее время известны различные технические решения по разработке узлов и подсистем БСКИ, однако широкомасштабного внедрения геоинформационных ресурсов в состав БРЭО ЛА пока не произошло. Известны, например, разработки:

– Санкт-Петербургского ОКБ «Электроавтоматика» – система «БСКИ», осуществляющая хранение и вывод геоинформационных данных на экран бортового индикатора класса МФЦИ (многофункциональный цветной индикатор);
– ОАО «РПКБ «Раменское» – наземный унифицированный комплекс детального планирования действий авиации и подготовки полетных заданий, обеспечивающий планирование действий для решения задач навигации, патрулирования.

Зарубежные компании Honeywel, Harris Corporation, Rockwell Collins также работают над реализацией проектов («The right information, Right now») комплексной геоинформационной поддержки задач пилотирования. Однако существенным недостатком всех известных технических решений является низкий уровень автоматизации процессов подготовки, хранения и воспроизведения на средствах бортовой

индикации геоинформационных данных. В этой связи актуальной является задача разработки методов и средств автоматизации процессов работы с геоинформационными данными.

Принципы формирования геоинформационных данных

Информационная потребность экипажа ЛА зависит от режима полета и сложившихся условий полета. В различных полетных ситуациях оказывается востребованным отображение пространственной информации различной природы. Для отображения экипажу ЛА актуальных геоинформационных данных используется цифровое представление карты местности [3].

Цифровая карта местности представляет собой векторизованное преобразование исходного бумажного носителя, сохраненное в электронном виде в формате массива данных и команд. Векторизация может осуществляться также путем обработки геодезических и тахеометрических снимков, полученных с использованием приборов системы глобального спутникового позиционирования [4].

Для хранения массива данных используются специальные базы данных. Цифровая карта местности состоит из набора различных слоев [5, 6]: рельеф суши, растительность, гидрография, гидротехнические сооружения, промышленные и социальные объекты, названия и подписи, населенные пункты, дорожные сооружения и т.д. Формат хранения массива данных и команд – DFX (Drawing Exchange Format) или SXF (Storage and eXchange Format), что позволяет непосредственно обрабатывать массив картографической информации в различных системах автоматизированного проектирования (САПР).

Привязка геоинформационных объектов к слоям цифровой карты местности осуществляется по следующей системе отношений:

– по принадлежности к определенному виду пространственной информации (аэронавигационной, оперативно-тактической, план полета, результаты навигационных расчетов и т.д.);
– по принадлежности к пространственной информации (рельеф, гидрография, населенные пункты, дорожная сеть и т.д.);
– по размеру объекта (большой, средний, малый);
– по характеру влияния объектов на режим полета (радиомаяки ближней навигации, препятствия, визуальные ориентиры);
– по времени года.

Формат хранения массива цифровой карты местности организован как последовательность информационных слов, содержащих параметры данных и команд (таблица).

Код примитива	Параметр данных	Графический примитив (команда)
0001	*X*-начальное, *Y*-начальное, *X*-конечное, *Y*-конечное	Линия
0010	*X*-центра, *Y*-центра, Радиус	Окружность
0011	*X*-центра, *Y*-центра, Радиус, Угол начальный, Угол конечный	Дуга
0100	*X*-начальное, *Y*-начальное, Номер знака	Знак/спецсимвол
0101	*X*-начальное, *Y*-начальное, *X*1-, *Y*1-, ... , *X*-конечное, *Y*-конечное	Полигон
0111	Атрибут	Установка атрибутов
1000	Номер цвета примитива в палитре	Установка цвета
1100	Номер цвета фона в палитре	Установка фона
…	…	…

Таблица. Формат хранения массива цифровой карты

Пример реализации объекта цифровой карты местности в виде программного кода на языке Си:

– примитив «окружность»: void mg32_circle (unsigned int *x*, *y*, *r*), где *x* – горизонтальная координата центра выводимой окружности, *y* – вертикальная координата центра выводимой окружности, *r* – радиус окружности;
– примитив «линия»: void mg32_line(unsigned int *x*1, *y*1, *x*2, *y*2), где *x*1 – начальная горизонтальная координата линии, *y*1 – начальная вертикальная координата линии, *x*2 – конечная горизонтальная координата линии, *y*2 – конечная вертикальная координата линии;
– примитив «знак»: void mg32_outtextxy(unsigned int *x*, *y*, textcode), где *x* – горизонтальная координата выводимого знака; *y* – вертикальная координата выводимого знака, textcode – номер (код) знака в базе данных.

Для создания библиотеки графических примитивов типа «знак» была разработана специализированная САПР, окно рабочей программы которой приведено на рис. 1. САПР позволяет создавать электронные образы-символы алфавита в кодировке ASCII (American Standart Code for Information Interchange), а также знаки специального типа. В последствии библиотека знаков и специальных символов заносится в постоянную память БСКИ.

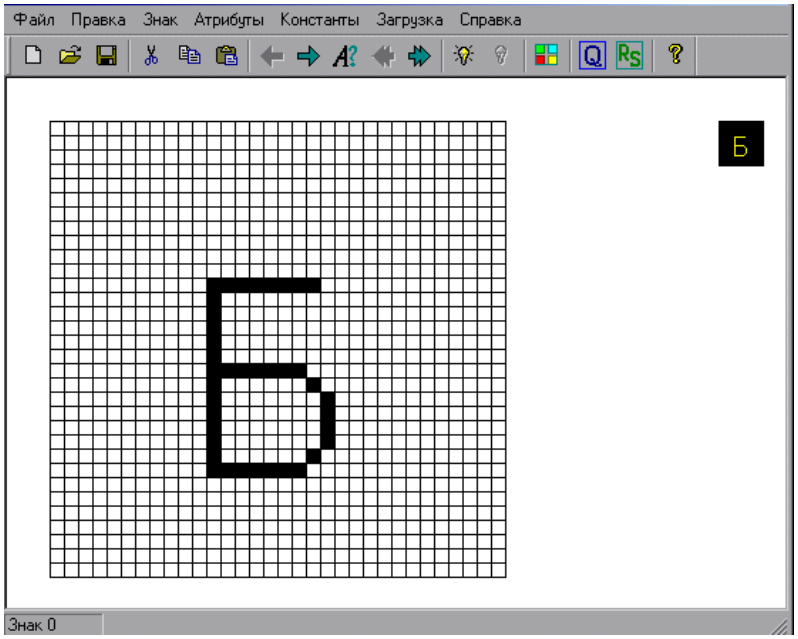
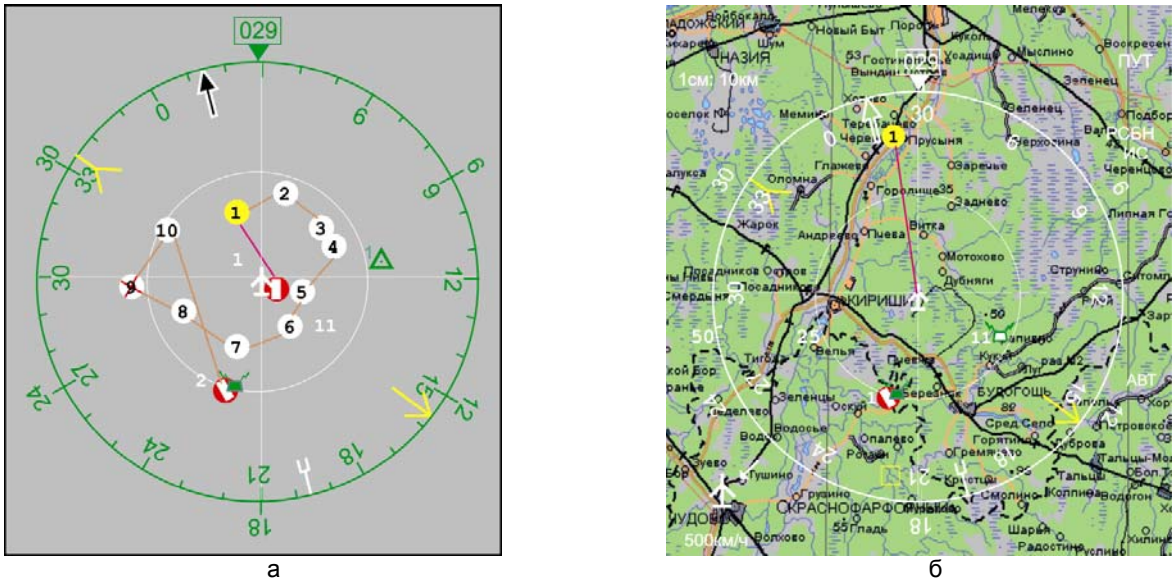


Рис. 1. Окно программы САПР для создания библиотеки символов (приведен пример знакоместа, содержащего символ буквы «Б» в малом прописном шрифте)



а б

Рис. 2. Примеры информационных кадров, отображаемых на бортовых средствах индикации: навигационная информация (а); геоинформационная и навигационная информации в режиме совмещения (б)

При пилотировании ЛА навигационная и оперативно-тактическая информация отображается на средствах бортовой индикации в режиме совмещения (одновременного отображения) с геоинформационными данными (рис. 2). В процессе движения ЛА над местностью изображение геоинформационных данных на средствах бортовой индикации непрерывно смещается, а в процессе разворота ЛА цифровая карта местности также поворачивается [7] в направлении движения ЛА.

Основными характеристиками качества отображения геоинформационных данных являются:

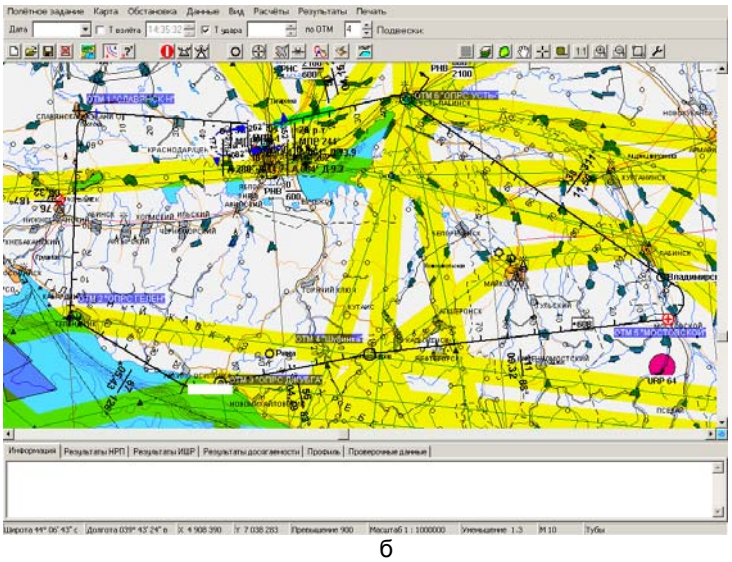
– читаемость – различимость элементов и деталей цифровой карты местности;
– наглядность – возможность зрительного восприятия пилотом пространственных форм (размеров объектов и их размещения на цифровой карте местности);
– объективность карты – соответствие местности состоянию отображаемых цифровых данных;
– точность – соответствие местоположения отображаемых объектов на цифровой карте местности положению этих объектов в действительности в зоне полета.

Читаемость геоинформационных данных достигается за счет использования принципа послойного разделения данных, отбора актуальных слоев цифровой карты, подлежащих отображению, и выбора подходящего масштаба отображения. Наглядность геоинформационных данных достигается за счет различных способов отображения объектов и ориентации мнемокадра карты местности в системе координат средства бортовой индикации. Объективность геоинформационных данных достигается за счет своевременного обновления массива геоинформационных данных в процессе эксплуатации БСКИ. Точность геоинформационных данных достигается за счет выбора масштаба отображения геоинформационных данных и использования данных, полученных от достоверного источника (сертифицированного, например, Министерством обороны Российской Федерации).

Автоматизированное рабочее место оператора БСКИ

Для автоматического планирования полетного задания, выполнения штурманских расчетов, формирования массива цифровой карты местности и записи этих данных на внешний носитель разработано специализированной рабочее место оператора БСКИ и программа САПР. Фотография рабочего места оператора приведена на рис. 3, а.

а



б

Рис. 3. Внешний вид рабочего места оператора БСКИ (а) и окно рабочей программы САПР (б)

Рабочее место оператора состоит из персонального компьютера с установленной САПР и устройством сопряжения с системой БСКИ. САПР позволяет планировать маршрут полета, выбрать фрагмент карты местности в пределах маршрута, определить аэропорт взлета и аэропорт посадки из базы данных аэронавигации. Оператору САПР БСКИ доступны следующие функции:

– планирование полетного задания, выполнение навигационных и инженерно-штурманских расчетов полета;
– оценка времени полета с заданным остатком топлива, выбор высоты полета и выбор маршрута полета для определения фрагмента массива геоинформационных данных и его занесения в БСКИ;
– выполнение расчета безопасных высот на маршруте полета и в районе аэродромов взлета и посадки.

Внешний вид рабочего окна программы САПР приведен на рис. 3, б. Интерфейсное меню программы САПР состоит из следующих опций: «Полетное задание», «Карта», «Обстановка», «Данные», «Вид», «Расчеты», «Результаты», «Печать».

Команды меню «Полетное задание» выполняют функцию управления созданием и редактированием полетного задания.

Команды меню «Карта» выполняют функцию выбора и управления отображаемыми геоинформационными данными, включая:

– теневое представление рельефа – подключение изображения матрицы рельефа местности в теневом контрасте;
– цветовое представление рельефа – отображение матрицы рельефа местности в цветном контрасте относительно заданной высоты полета. Местность с превышениями рельефа на 300 м ниже заданной высоты полета отображается зеленым цветом; местность с превышениями рельефа местности до 300 м отображается желтым цветом; местность с превышениями рельефа местности от 300 м выше заданной высоты полета отображается цветом (оттенком) от темно-коричневого к красному.

Команды меню «Обстановка» выполняют функцию выбора и управления отображаемой навигационной и тактической обстановкой. Команды меню «Данные» выполняют функцию выбора данных, необходимых для планирования полетного задания и выполнения расчетов. Опции меню включают выбор воздушной трассы, аэродромов по маршруту полета ЛА, выбор визуально видимых ориентиров, выбор опасных точек при взлете и посадке, выбор маршрута полета. Команды меню «Вид» выполняют функцию управления отображаемыми объектами полетного задания и обстановки. Команды меню «Расчеты» выполняют функцию управления подпрограммами, осуществляющими расчеты. Опции меню включают инженерно-штурманские расчеты, выбор безопасных высот полета, выбора астроявлений на маршруте полета ЛА, дальность полета. Команды меню «Результаты» выполняют функцию управления подпрограммами, осуществляющими отображение результатов расчета прикладных программ. Команды меню «Печать» выполняют функцию управления подпрограммами, осуществляющими отображение, редактирование и вывод на устройство печати бланков результатов расчета прикладных программ.

Состав системы БСКИ

Бортовая система картографической информации осуществляет информационное взаимодействие с системами БРЭО ЛА, а также обеспечивает хранение, считывание, подготовку, преобразование и выдачу цифровой карты местности, навигационной и оперативно-тактической информации (в режиме совмещения) на бортовые средства отображения информации [8].

Функциональная схема БСКИ представлена на рис. 4.

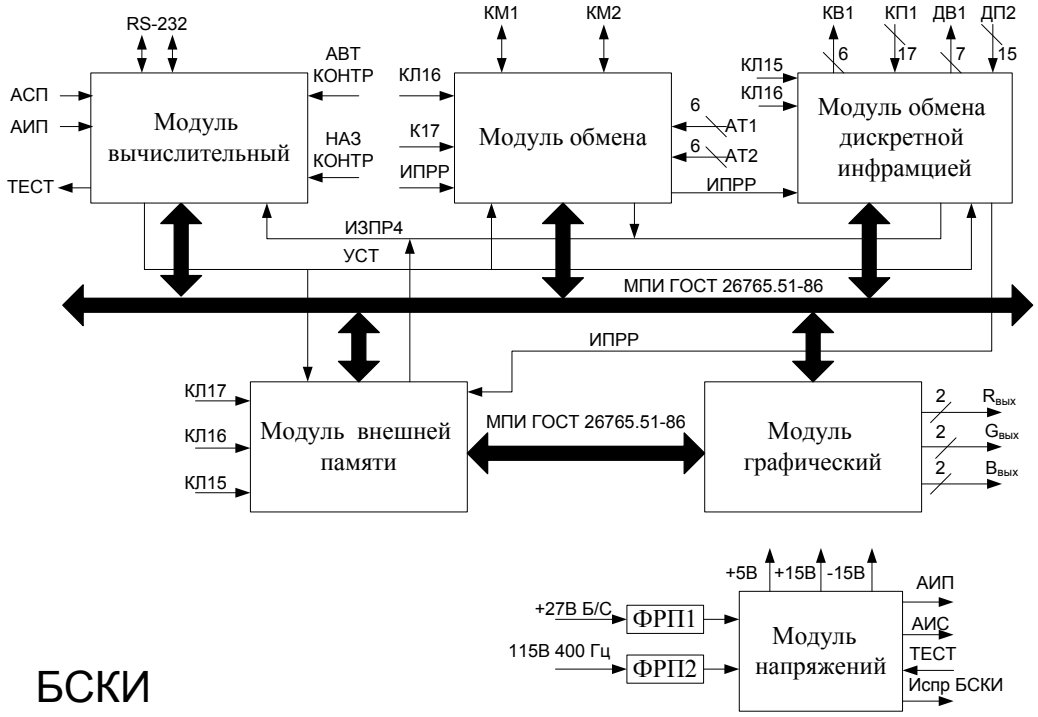


Рис. 4. Функциональная схема БСКИ: АСП – авария сетевого питания; АИП – авария источника питания; АВТКОНТР – автономный контроль; НАЗКОНТР – наземный контроль; КМ1, КМ2 – канал мультиплексный; УСТ – установка, ДВ1 – сигнал выдачи дискретной информации (разовой команды); ДП2 – сигнал приема дискретной информации (разовой команды); КВ1 – канал выдачи последовательного кода; КП1 – канал приема последовательного кода; ФРП – фильтр радиопомех; ТЕСТ – сигнал теста модуля; ИПРР – сигнал разрешение прерывания; КЛ – ключи модулей на системной шине; АТ – ключи БСКИ на мультиплексной шине в составе бортового оборудования ЛА; МПИ – магистральный параллельный интерфейс; Испр БСКИ – сигнал исправности

БСКИ состоит из следующих функциональных узлов:

– модуль вычислительный (МВ) – используется как модуль центрального процессора БСКИ;
– модуль обмена дискретной информацией – используется для информационного обмена с абонентами БРЭО по последовательному каналу обмена;
– модуль графический (МГ) – используется для формирования и вывода на средства индикации БРЭО цифровой карты местности в телевизионном формате;
– модуль внешней памяти (МП) – используется для записи и хранения геоинформационных данных, заносимых с внешнего носителя;

– модуль обмена (МО) – используется для информационного обмена с абонентами БРЭО по мультиплексному каналу обмена;
– модуль напряжений (МН) – используется для электропитания модулей, входящих в состав БСКИ.

БСКИ обеспечивает:

– взаимодействие с бортовым радиоэлектронным оборудованием по мультиплексному каналу информационного обмена, по каналам последовательных кодов и разовых команд;
– хранение, считывание, преобразование и передачу совмещенного телевизионного изображения цифровой карты местности и оперативно-тактической информации для отображения на бортовые средства индикации.

При включении питания БСКИ производится инициализация процессора МВ и начальное тестирование системы с формированием сигнала УСТ на системной шине. Сигнал установки запускает процесс начального конфигурирования программируемых логических интегральных схем, входящих в состав функциональных модулей. После успешного прохождения теста начального включения БСКИ формирует сигнал Испр БСКИ внешним абонентам БРЭО и разовый сигнал исправности на лицевой панели (отображается единичным светосигнализатором). Занесенное в МВ функциональное программное обеспечение исполняется процессором. Геоинформационные данные из МП поступают в МГ, где формируется и выводится по цветному аналоговому каналу RGB (Red, Green, Blue) телевизионный сигнал, содержащий электронное изображение карты. Выводимый на средства индикации фрагмент карты определяется текущим местоположением самолета, координаты которого система БСКИ получает по мультиплексному каналу связи или по дискретному каналу связи от абонентов БРЭО.

Заключение

Для повышения эффективности применения бортовой радиоэлектронной аппаратуры летательного аппарата состав бортового радиоэлектронного оборудования необходимо дополнить устройством формирования и вывода на бортовое средство индикации цифровой карты местности с «наложенной» навигационно-тактической обстановкой и визуализацией подстилающего рельефа местности.

Вывод геоинформационных данных на экран бортового индикатора позволяет экипажу летательного аппарата своевременно получать пространственную информацию местонахождения объекта, визуально ориентироваться на местности. Также повышается информационная осведомленность экипажа, упрощается решение задачи навигационной ориентации и восприятия тактической обстановки в зоне полетов.

Литература

1. Жаринов И.О., Жаринов О.О. Бортовые системы картографической информации. Принципы построения геоинформационных ресурсов: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 40 с.
2. Бабак В.П., Быков В.Н., Виноградов Ю.Н., Ильченко Ю.А., Парамонов П.П., Суслов В.Д., Сухомлинов Д.В., Уткин Б.В., Юшинский Ю.Т. Устройство синтеза картографических изображений. Патент на полезную модель №2250182 C1 RU, МПК G06F 1/00. № 2004121191/11. Заявл. 13.07.2004. Опубл. 20.04.2005.
3. Малынкин К.В., Мухин И.Б. Способ ситуационной адаптации пространственных данных в бортовых геоинформационных системах // Научно-технический вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2012. – № 185. – С. 111–117.
4. Малышев В.В., Куршин В.В. Навигация авиационного потребителя с использованием цифровых карт // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – № 12. – С. 1–19.
5. Парамонов П.П., Коновалов П.В., Жаринов И.О., Кирсанова Ю.А., Уткин С.Б. Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 165–167.
6. Парамонов П.П., Ильченко Ю.А., Жаринов И.О. Теория и практика статистического анализа картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов // Датчики и системы. – 2001. – № 8. – С. 15–19.
7. Парамонов П.П., Ильченко Ю.А., Жаринов И.О., Тарасов П.Ю. Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 5. – С. 50–57.
8. Копорский Н.С., Видин Б.В., Жаринов И.О. Система бортовой картографической информации пилотируемых летательных аппаратов. Основные принципы построения // Сб. трудов 10-й международной конференции «Теория и технология программирования и защиты информации». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – С. 18–23.

Парамонов Павел Павлович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, postmaster@elavt.spb.ru

Костишин Максим Олегович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, job.max@me.com

Жаринов Игорь Олегович – Россия, Санкт-Петербург, СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П.А. Ефимова, руководитель учебно-научного центра, доктор технических наук, доцент, igor_rabota@pisem.net

Нечаев Владимир Анатольевич – Россия, Санкт-Петербург, СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П.А. Ефимова, руководитель научно-исследовательского центра, nil-12@mail.ru

Сударчиков Сергей Алексеевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, s-a-sudarchikov@yandex.ru

9 ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.81.004.17:620.191.355.001.5

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

А.Ю. Иванов, Д.Б. Леонов

Обосновывается необходимость повышения качества изделий путем оптимизации микрогеометрии их поверхностей. Предлагается решение задачи технологического обеспечения коррозионной стойкости изделий машиностроения на основе применения непараметрического метода оценки и контроля микрогеометрии поверхности. Представлены параметры технологии обработки, гарантирующие получение наилучшей из возможных в конкретных производственных условиях шероховатости поверхности, обеспечивающей минимальное значение глубины проникновения коррозии в поверхность деталей из сплава Д16Т.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, непараметрический метод, коррозионная стойкость, глубина проникновения коррозии.

Введение

Шероховатость поверхности является существенным фактором, влияющим на ряд функциональных свойств деталей машин. Среди этих свойств особое место занимает коррозионная стойкость [1].

Коррозия обусловлена протеканием химических или электрохимических реакций и является следствием термодинамической неустойчивости металлов в свободном состоянии [2]. Термодинамическая стабильность любого материала зависит от ряда факторов, которые описываются комплексом параметров качества поверхностного слоя, включающим геометрические и физико-механические параметры состояния поверхностного слоя, формируемые в процессе изготовления детали. В этой связи целесообразными являются исследования технологического обеспечения коррозионной стойкости изделий машиностроения на основе рационального выбора качества поверхностного слоя, технологического метода и режимов обработки.

Данной проблемой занимался ряд российских и зарубежных ученых, среди которых Ю.Г. Шнейдер, Э.В. Рыжов, В.В. Романов, М. Фонтан [3–6]. В своих исследованиях они рассматривали шероховатость поверхности деталей как набор различных параметров – радиусов заострения вершин и впадин неровностей (r, r'), коэффициентов заполнения профиля ($к_{зап}$), среднего шага неровностей по вершинам (S) и параметрических критериев оценки шероховатости поверхности (Ra, Rz).

В дальнейшем исследования взаимосвязи функциональных свойств изделий с шероховатостью их поверхности проводились на базе предложенного профессором В.А. Валетовым непараметрического метода оценки и контроля микрогеометрии поверхности [7–10]. В настоящей работе приведены результаты исследования влияния шероховатости поверхности на коррозионную стойкость деталей из алюминиевого сплава Д16Т с использованием непараметрических критериев – плотности распределения ординат и плотности распределения тангенсов углов наклона профиля.

Постановка эксперимента

Исследования проводились с использованием детали из сплава Д16Т (рис. 1).

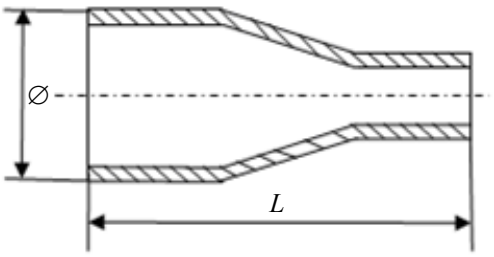


Рис. 1. Чертеж детали: ∅ = 68 мм, L = 130 мм

Технологический процесс изготовления детали включает холодную штамповку и строгание при разных режимах резания.

Для оценки влияния шероховатости поверхности на коррозионную стойкость детали были изготовлены 4 группы образцов с разной шероховатостью поверхности (табл. 1). Режимы технологической обработки процесса строгания выбраны с учетом возможностей технологического оборудования на конкретном производстве. При этом образцы в 3 группе изготовлены по принятой на конкретном производ-

стве технологии для обработки этой детали. Профиль поверхности каждого образца был снят с использованием профилометра MITUTOYO SJ-201P. В табл. 1 приведено значение только для одного параметра шероховатости поверхности *Rz*, (параметрический критерий оценки шероховатости поверхности), поскольку именно этот параметр используется для нормирования шероховатости на рабочем чертеже детали.

Номер группы образцов	Вид обработки	Режимы обработки	*Rz*, мкм
1	Строгание	*S*=0,3 мм/мин, *t*=0,8 мм, *V*=650 м/мин	3,24
2	Строгание	*S*=11 мм/мин, *t*=0,8 мм, *V*=125 м/мин	5,38
3	Строгание	*S*=20 мм/мин, *t*=0,8 мм, *V*=150 м/мин	15,54
4	Строгание	*S*=33 мм/мин, *t*=0,8 мм, *V*=175 м/мин	34,56

Таблица 1. Значения параметра *Rz* (высота неровностей профиля по десяти точкам) при различных режимах обработки детали: *S* – подача; *t* – глубина резания; *V* – скорость резания

Изготовленные образцы исследованы на коррозионную стойкость. Проверка проводилась металлографическим способом согласно ГОСТ 9.021-74 [11], регламентирующему методы ускоренного испытания алюминия и алюминиевых сплавов на межкристаллитную коррозию. Испытание проводилось в растворе, содержащем 3%-ный раствор хлористого натрия и 1%-ный раствор соляной кислоты при температуре раствора 18–25ºС. Продолжительность эксперимента составляла 24 ч.

При проведении эксперимента фиксировались характер коррозии и максимальное значение глубины коррозии. Для этого изготавливались шлифы по ГОСТ 1778-70 [12].

Последовательность изготовления шлифа:
- шлифование (абразивная шкурка Р400);
- притирка (бумажный круг с пастой, содержащей шлифовальный порошок М28);
- полирование (алмазные пасты зернистостью 28/20, 14/10 и 7/5).

Для выявления микроструктуры сплава проводилось травление образцов в следующем составе:
- кислота азотная (70%) – 2,5 мл;
- кислота соляная (концентрированная) – 1,5 мл;
- кислота фтороводородная (48%) – 1,0 мл;
- вода дистиллированная – 95,0 мл.

Результаты исследования

Исследования (фиксация и замеры глубин коррозии) проводились на микроскопе МИМ-7 при увеличении 200$^{\times}$. Фотографии микроструктур образцов, изготовленных при разных режимах, после обработки приведены на рис. 2.

а б в г

Рис. 2. Фотографии микроструктур образцов групп 1–4 (а)–(г) соответственно (см. табл. 1).

Замеры глубины проникновения коррозии показали:
- для образцов в группе 1 – наличие участков с глубиной до 25 мкм;
- для образцов в группе 2 – наличие участков с глубиной от 22 мкм до 30 мкм;
- для образцов в группе 3 – наличие участков с глубиной от 28 мкм до 41 мкм;
- для образцов в группе 4 – наличие участков с глубиной от 40 мкм до 45 мкм.

Полученные результаты говорят о существенном влиянии шероховатости поверхности на глубину проникновения коррозии в поверхность исследуемых образцов. Однако задача оптимизации шероховатости не может быть достоверно решена с использованием стандартных параметров шероховатости, так как изменение параметров *Ra* или *Rz* не характеризует фактического изменения структуры микрорельефа [7].

Для обеспечения экспериментально найденного и заданного на чертеже предпочтительного параметра шероховатости может использоваться либо разное оборудование, либо разные инструменты, что приводит к изменению структуры микрорельефа поверхности и, как следствие, к изменению их свойств. С целью более полного и точного описания шероховатости обработанных поверхностей для каждого об-

разца были получены графики непараметрических критериев (графические изображения функций плотностей распределения тангенсов углов наклона профилей, ординат профилей и кривые Аббота).

Учитывая случайную составляющую при формировании микрорельефа поверхности образцов [7, 10], на основе теории случайных функций можно предположить, что предложенные графические изображения этих функций практически однозначно определяют характер микрогеометрии исследуемых поверхностей. На рис. 3 приведены графики непараметрических критериев, где номер графика соответствует номеру образца.

Рис. 3. Графики (номер графика соответствует номеру образца) непараметрического критерия «Плотность распределения ординат профиля» для исследуемых образцов: Y/R_q – отношение величины i-ой ординаты профиля к среднеквадратическому отклонению профиля; H – частота появления ординаты

Полученные графики доказывают иррегулярность и хаотичность микрорельефа поверхностей с неоднородными по форме и размерам неровностями [3], которые формируются при обработке поверхности строганием.

Определение наилучшей шероховатости поверхности, обеспечивающей наименьшую глубину проникновения коррозии

Учитывая, что режимы обработки поверхностей образцов непосредственно влияют на шероховатость, можно сделать вывод о том, что полученные результаты свидетельствуют о влиянии микрогеометрии поверхности на глубину проникновения коррозии. Это позволяет продолжить исследование в направлении оптимизации процесса получения оптимальной шероховатости поверхности, позволяющей обеспечить наилучшую коррозионную стойкость детали из сплава Д16Т в конкретных производственных условиях.

На этом этапе была использована теория планирования эксперимента [13]. Оптимизация проводилась путем определения наименьшего возможного значения глубины проникновения коррозии в поверхность детали из сплава Д16Т (параметр оптимизации) при различных режимах обработки поверхности образцов (факторы оптимизации). В табл. 2 приведены основные факторы и диапазоны их варьирования, исходя из технических возможностей использованного оборудования.

Фактор	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровень факторов		
			Нижний (–1)	Основной (0)	Верхний (+1)
Подача S, мм/мин	X_1	±0,2	0,1	0,3	0,5
Скорость резания V, м/мин	X_2	±20	670	690	710
Глубина резания t, мм	X_3	±0,1	0,8	0,9	1

Таблица 2. Основные факторы и диапазоны их варьирования

Поскольку факторы процесса неоднородны и имеют различные единицы измерения, а числа, выражающие величины факторов, имеют различные порядки, они были приведены к единой системе счисления путем перехода от действительных значений факторов к кодированным [13]:

$$\tilde{X}_i = \frac{X_i - X_{i\text{осн}}}{\Delta X_i},$$

где $\tilde{X}_i$ – кодированное значение фактора; X_i – действительные значения фактора; $X_{i\text{осн}}$ – значение фактора на основном уровне; ΔX_i – интервал варьирования текущего фактора; i – номер фактора.

Проведенный статистический расчет позволил получить:

– адекватную (по критерию Фишера) математическую модель процесса, описывающую связь между параметром и факторами оптимизации,

$$K = 36,5 + 9S - 3,75V + 2t + 1SV .$$

Модель показывает характер влияния каждого из параметров обработки поверхности образцов на глубину проникновения коррозии;
– технологические режимы обработки, при которых обеспечивается наименьшее значение глубины проникновения коррозии в поверхность деталей из сплава Д16Т на конкретном производстве (табл. 3);
– наилучшую из возможных в конкретных производственных условиях (эталонную) шероховатость поверхности (рис. 4), обеспечивающую минимальное значение глубины проникновения коррозии в поверхность деталей из сплава Д16Т.

Подача S, мм/мин	Скорость резания V, м/мин	Глубина резания t, мм
0,1	700	0,8

Таблица 3. Параметры технологической обработки поверхности строганием для получения «эталонной» микрогеометрии

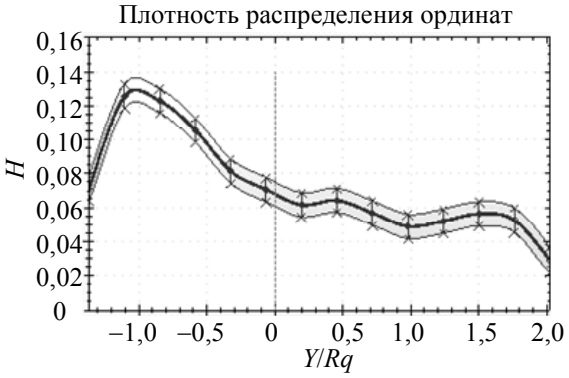


Рис. 4. Эталонный график «Плотность распределения ординат профиля» с допуском на возможные отклонения

Приведенный график (рис. 4) показывает, что оптимальное распределение ординат профиля является асимметричным, с одним ярко выраженным экстремумом. Такое распределение неровностей на поверхности детали из материала Д16Т будет гарантировать наименьшее значение глубины проникновения коррозии.

Заключение

Применение непараметрического метода оценки и контроля микрогеометрии поверхности позволяет:
– показать влияние шероховатости поверхности исследуемого образца на коррозионную стойкость;
– экспериментально получить наилучшую из возможных в конкретных производственных условиях шероховатость поверхности деталей из сплава Д16Т, позволяющую обеспечить наилучшую коррозионную стойкость;
– получить параметры технологической обработки деталей, позволяющей обеспечить данную шероховатость поверхности;
– осуществить быстрый и качественный контроль шероховатости поверхности деталей для серийного производства путем сравнения ее с эталонной.

Выполнение этих условий позволяет повысить качество производимой продукции для конкретного предприятия.

Литература

1. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. – Рига: Изд-во РПИ, 1975. – 216 с.
2. Рыбальченко В.С. Основы общей химии: Учебное пособие для студентов нехимических специальностей высших учебных заведений. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2011. – 408 с.
3. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей машин с регулярным микрорельефом. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.

4. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
5. Романов В.В. Методы исследования коррозии металлов. – М.: Металлургия, 1965. – 280 с.
6. Фонтан М.Н., Стейл Р. Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее. Коррозионное растрескивание металлов: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1985. – 488 с.
7. Мусалимов В.М., Валетов В.А. Динамика фрикционного взаимодействия. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 191 с.
8. Иванов А.Ю., Леонов Д.Б. Технологические методы обеспечения качества изделия // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5 (75). – С. 111–113.
9. Ivanov A.Y., Leonov D.B. Methodology for optimization, evaluation and control of products surface roughness // Journal of the Technical University. – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria «Fundamental Sciences and Applications». – 2012. – V. 17. – P. 19–23.
10. Валетов В.А., Третьяков С.Д. Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей: Учебно-методическое пособие. – СПб: СПб ГУИТМО, 2005. – 28 с.
11. ГОСТ 9.021-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию. Введ. 01.01.75. М.: Изд-во стандартов, 1978. 6 с.
12. ГОСТ 1778-70. Металлографические методы определения неметаллических включений. Введ. 01.01.72. М.: Изд-во стандартов, 1970. 35 с.
13. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 48 с.

Иванов Андрей Юрьевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, ivaanur72@mail.ru

Леонов Димилян Божидаров – Болгария, Сопот, ВМЗ АО Сопот, заместитель директора; Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант; dimilqn@mail.ru

10 МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.931

РАЗЛИЧЕНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ ПОВЕДЕНИЯ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ

Д.С. Юрасов, И.А. Зикратов

Работа посвящена идентификации и аутентификации пользователей в web-пространстве. Предложен способ различения двух пользователей, осуществляющих доступ в сеть Интернет с одного общего компьютера и браузера, основанный на анализе истории посещений сайтов каждым из пользователей. Способ базируется на выявлении часто и регулярно посещаемых сайтов и их последующей кластеризации иерархическим методом. Для проверки работоспособности способа был проведен анализ истории посещения сайтов более чем 260 000 пользователей, собранной с помощью cookie-идентификаторов в сети Интернет, которые хранятся на их компьютерах. Эксперимент показал высокий процент верно идентифицированных пользователей.

Ключевые слова: защита информации, иерархическая кластеризация, cookies, многопользовательский компьютер, идентификация пользователей, аутентификация.

Введение

Одной из важных задач в теории защиты информации является задача идентификации пользователя в сети Интернет. Идентификация и аутентификация являются важнейшими задачами, решаемыми при построении систем разграничения доступа, которые, в свою очередь, играют ключевую роль в системах обеспечения информационной безопасности.

В современных информационных системах, как правило, применяются способы идентификации, основанные на информации о IP-адресах компьютеров посетителей и технологии Cookie [1, 2]. Cookies представляют собой данные небольшого объема, которые создаются при посещении пользователями веб-сайтов, хранятся на их компьютерах и содержат информацию, например, о настройках веб-сайта или о профиле. Усовершенствованиями этих способов являются решения, предложенные в работах [3–5], которые заключаются в анализе служебной информации о компьютере пользователя и выборе наиболее значимых признаков. Они позволили существенно увеличить степень достоверности идентификации пользователей при отсутствии информации о IP-адресах или cookies. Однако всем этим способам присущ существенный недостаток: они отождествляют пользователя и его компьютер или браузер, что не всегда корректно. По результатам последних исследований, доля многопользовательских компьютеров (т.е. таких, за которым работают два и более пользователей) варьируется от 20 до 40% [6].

Целью настоящей работы является разработка способа, позволяющего различить пользователей, осуществляющих доступ в сеть Интернет посредством одного компьютера и браузера. Высокий процент многопользовательских компьютеров говорит об актуальности этой задачи, однако, среди открытых источников печати публикации, в которых предложен метод ее решения, не представлены.

Предложенный способ заключается в выявлении часто и регулярно посещаемых пользователем сайтов и их последующей кластеризации. Для решения поставленной задачи в работе использованы данные о посещении пользователем сайтов в сети Интернет, которые могут быть либо собраны с помощью Cookie или других технологий, либо получены из сторонних источников.

Способ различения пользователей с общими компьютером и браузером

Подготовка данных. Для сбора информации о посещении пользователями сайтов использовались данные Cookie, поэтому далее отождествляем пользователей с браузером.

Как правило, системы разграничения доступа не располагают информацией о количестве людей, пользующихся конкретными компьютером и браузером. Чтобы решить эту проблему при подготовке данных, объединим истории посещений сайтов для случайно выбранных пар cookies. Всего было объединено более 130 000 пар пользователей. Такие пары называем «склеенными», как и истории посещений сайтов, полученные объединением историй посещений исходных пользователей. В результате были получены данные, в которых за каждым cookie-идентификатором скрывается минимум два пользователя. Такие cookies называем многопользовательскими.

Значимые сайты. В основу идеи различения пользователей положен тот факт, что у большинства пользователей существуют сайты, которые они посещают достаточно часто и регулярно. Для выявления таких сайтов история посещений каждого пользователя была разбита на сессии. Под пользовательской сессией понимается упорядоченная по времени последовательность посещений сайтов, в которой временной интервал между соседними посещениями сайтов не превышает 30 минут. Сессии объединенных пар cookies были пронумерованы случайным образом, но так, чтобы исходный хронологический порядок

сессий «несклеенных» пользователей сохранился. Будем говорить, что сайт является значимым для пользователя, если выполнены два условия:

1. он встретился хотя бы в десятой части всех известных сессий;
2. если пронумеровать в хронологическом порядке все известные сессии пользователя, то дисперсия номеров сессий, в которых встретился данный сайт, больше определенного числа.

Первое условие гарантирует частоту посещения сайта, а второе – регулярность, исключая сайты, к которым пользователь проявил лишь локальный интерес, т.е. интенсивно интересовался ими лишь на протяжении некоторого относительно короткого интервала времени.

В изучаемых искусственных данных у всех пользователей нашелся хотя бы один «значимый» сайт. Более 88% обычных, «несклеенных» пользователей имеют хотя бы один «значимый» сайт. Для всех сайтов было определено количество пользователей, для которых данный сайт является «значимым». Самыми популярными такими сайтами оказались vk.com, e.mail.ru и odnoklassniki.ru.

Кластеризация значимых сайтов. Экспериментальные данные были подготовлены таким образом, что за каждым cookie-идентификатором в них скрываются как минимум два реальных пользователя, следовательно, и значимые сайты должны для них делиться минимум на две соответствующие группы; далее предполагаем, что их ровно две.

Рассмотрим конкретную cookie *u*. Пусть у нее было всего *n* сессий, ее значимыми сайтами являются $s_1,...,s_m$. Для всех *j* от 1 до *m* и всех *k* от 1 до *n* сайту s_j поставим в соответствие вектор $s_{j1},...,s_{jn}$, где s_{jk} принимает значение 1, если пользователь *u* посещал сайт s_j в *k*-ю сессию, и 0 иначе.

В качестве расстояния между «значимыми» сайтами s_i и s_j пользователя *u* использовалось расстояние Жаккара *J*, которое является одной из самых распространенных бинарных мер сходства объектов. Оно вычисляется по формуле

$$J = \frac{M_i + M_j}{M_i + M_j + M_{ij}},$$

где M_{ij} – количество сессий пользователя *u*, в которых присутствуют и s_i, и s_j; M_i – количество сессий пользователя *u*, в которых присутствует сайт s_i, но нет сайта s_j; M_j – количество сессий пользователя *u*, в которых присутствует сайт s_j, но нет сайта s_i [7, 8]. Из определения расстояния Жаккара следует, что в идеальной ситуации расстояние между значимыми сайтами разных пользователей «склеенной» cookie *u* будет близко к 1, а между сайтами одного пользователя – к 0, что является еще одной причиной для выбора именно этой меры сходства объектов.

Далее сайты первой категории cookie *u* были разделены на две группы с помощью иерархической кластеризации, с использованием введенной меры сходства. В качестве расстояния между кластерами было выбрано арифметическое среднее попарных расстояний между сайтами, так как оно является менее чувствительным, по сравнению с другими общепринятыми методами расчета, к выбросам и искажениям в данных, которые, учитывая специфику сбора информации, не исключены [9, 10].

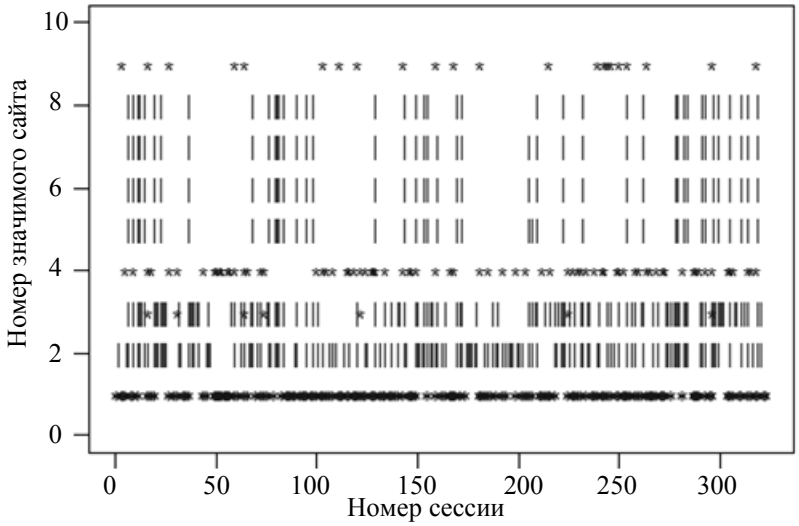


Рис. 1. Сессии пользователя: «*» – история посещений одного пользователя, «|» – другого

В качестве примера рассмотрим одну из «склеенных» cookies. На графике по оси абсцисс отметим номера сессий этой cookie, по оси ординат – номера ее значимых сайтов. Точку для сайта *i* сессии *j* отме-

чаем, если cookie посещала этот сайт в эту сессию. Звездочка или вертикальная черта обозначают, какому из изначальных «несклеенных» пользователей принадлежит данная сессия (рис. 1). Таким образом, все точки над одной сессией отмечены одинаковым символом. Из данного рисунка видно, что сайты 1, 4 и 9 посещал только пользователь, помеченный «*», сайты 2, 6, 7, 8 посещал только пользователь, помеченный «|», сайт 3 – в основном пользователь, помеченный «|».

Получившееся автоматическое разделение сайтов на кластеры имеет четко интерпретируемую трактовку, отвечающую требованиям решаемой задачи (рис. 2).

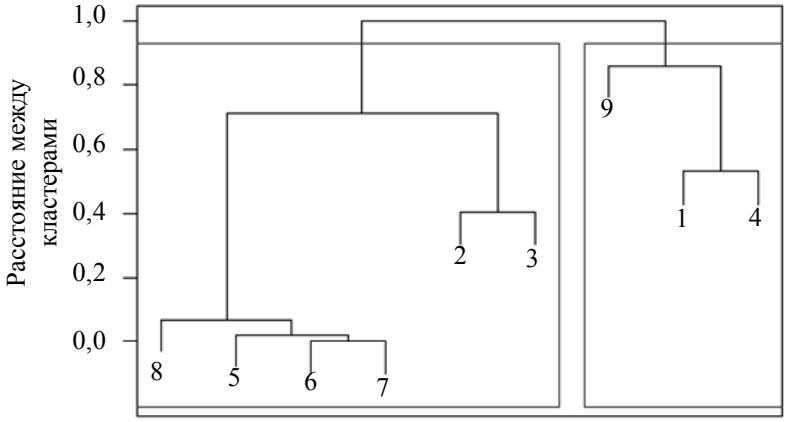


Рис. 2. Дендрограмма кластеризации «значимых» сайтов: 1–9 – номера сайтов

Результаты идентификации

Таким образом, для каждого cookie-идентификатора был сформирован список его значимых сайтов и произведена их кластеризация на две группы, которые обозначим как *A* и *B*. Для каждой его сессии было посчитано, сколько в ней сайтов из одного кластера и сколько из другого. Считаем, что сессия принадлежит пользователю U_A, если в ней встречается больше сайтов из кластера *A*, чем из *B*; сессия принадлежит пользователю U_B, если в ней встречается больше сайтов из кластера *B*, чем из *A*, остальные сессии считаем нейтральными. Почти все сессии получили метку U_A или U_B, нейтральные сессии далее были исключены из рассмотрения. В итоге все оставшиеся сессии имеют ровно по две метки – U_A или U_B и «*» или «|». Для каждой cookie была построена таблица сопряженности начальных и новых меток. В качестве количества правильно идентифицированных сессий для нее была взята большая из сумм чисел на главной и побочной диагоналях. Средний процент правильно идентифицированных сессий по всем пользователям в экспериментальных данных равен 76,7%.

Отметим, что процент правильно идентифицированных сессий пользователя зависит от их количества. Это видно из графика (рис. 3), где по оси абсцисс отмечено число сессий, а по оси ординат – средний процент правильно идентифицированных сессий для пользователя с их соответствующим количеством. Таким образом, для качественного разделения истории посещений сайтов многопользовательской cookie необходимо, чтобы у пользователя было по меньшей мере 100 сессий.

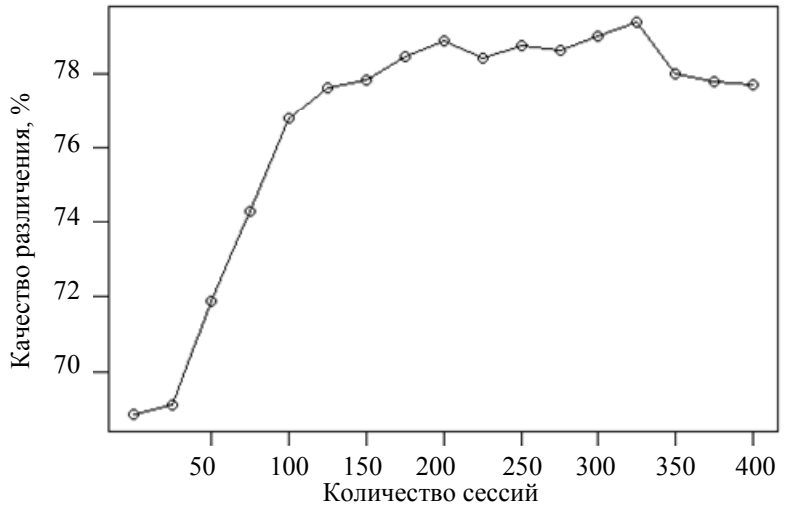


Рис. 3. Зависимость качества различения от количества сессий у пользователя

Заключение

Авторами разработан способ различения пары пользователей, осуществляющих доступ в сеть Интернет с одного компьютера и браузера, который основан на выявлении тех сайтов, которые пользователь посещает часто и регулярно. Для подтверждения работоспособности предложенного способа был подготовлен и проведен эксперимент с целью проверки качества различения более чем 260 000 пользователей на основе анализа их истории посещения сайтов. Процент правильно идентифицированных пользовательских сессий равен 76,7%, что является на сегодняшний день лучшим результатом. Дальнейшее исследование направлено на решение задачи определения факта, что компьютером и браузером пользуется несколько человек. Актуальной задачей является адаптация представленного способа для определения точного количества пользователей.

Литература

1. Understanding IP Addressing: Everything You Ever Wanted To Know [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.3com.com/other/pdfs/infra/corpinfo/en_US/501302.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 04.04.2013).
2. McKinkley K. Cleaning Up After Cookies. iSec Partners White Paper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.isecpartners.com/storage/white-papers/iSEC_Cleaning_Up_After_Cookies.pdf, свобод-ный. Яз. англ. (дата обращения 04.04.2013).
3. Бессонова Е.Е., Зикратов И.А., Колесников Ю.Л., Росков В.Ю. Способ идентификации пользователя в сети Интернет // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 133–137.
4. Бессонова Е.Е., Зикратов И.А., Росков В.Ю. Анализ способов идентификации пользователя в сети Интернет // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 6 (82). – С. 128–130.
5. Кантор И. Способы идентификации в интернете [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://javascript.ru/unsorted/id, свободный. Яз. рус. (дата обращения 04.04.2013).
6. Fulgoni G. When the Cookie Crumbles [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.comscore.com/Insights/Blog/When_the_Cookie_Crumbles, свободный. Яз. англ. (дата обращения 04.04.2013).
7. Lipkus A.H. A proof of the triangle inequality for the Tanimoto distance // Journal of Mathematical Chemistry. – 1999. – V. 26. – № 1–3. – P. 263–265.
8. Tan P., Steinbach M., Kumar V. Introduction to Data Mining. – Addison-Wesley, 2005. – P. 487–568.
9. Воронцов К. Лекции по алгоритмам кластеризации и многомерного шкалирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ccas.ru/voron/download/Clustering.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 04.04.2013).
10. Jain A., Murty M., Flynn P. Data Clustering: A Review // ACM Computing Surveys. – 1999. – V. 31. – № 3. – P. 264 – 323.

Юрасов Дмитрий Сергеевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, yurasov17@gmail.com

Зикратов Игорь Алексеевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, igzikratov@yandex.ru

11 ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338.242

НАЦИОНАЛЬНАЯ ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА: СТРУКТУРА, РОЛЬ ФИНАНСОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Т.Я. Красноперова

Рассматриваются теоретические проблемы формирования национальной инновационной системы, предложено авторское определение, в котором отмечена эволюционность ее развития как подсистемы экономической системы, реализация экономических интересов как цель деятельности и финансирование как непременное условие инновационной деятельности. Определены и обоснованы основные принципы национальной инновационной системы: целостность, целенаправленность, оптимальность, иерархичность, взаимосогласованность (координация) действий всех элементов системы и эволюционность развития. Показана структура и иерархия уровней функций – основных и обеспечивающих, определены функции финансовой составляющей и ее роль в обеспечении инновационного развития. В работе предложена структура национальной инновационной системы России с учетом особенностей ее развития. По мнению автора, она подразделяется по вертикали на федеральную и региональные; по горизонтали – на подсистемы по видам деятельности в связи с характером источника финансирования, а также организации в составе национальной инновационной системы, осуществляющие создание, внедрение, коммерциализацию и финансирование инноваций, подготовку кадров.

Ключевые слова: национальная инновационная система, банковский сектор, принципы системы, инновационное развитие, финансовое обеспечение.

Введение

Приоритетной задачей экономик различных стран является формирование эффективной национальной инновационной системы (НИС). Основополагающими для современной концепции НИС являются работы таких зарубежных ученых, как М. Портер, П. Самуэльсон, С. Фримен, Ф. Хайек, а также российских ученых А.И. Анчишкина, В.А. Васина, Л.М. Гохберга, Н.И. Ивановой, Л.Э. Миндели, И.Г. Осадчей, Ю.В. Яковца и других. Большой вклад в теорию внес Б. Лундвал [1], чьи исследования создали основу для разработки государственной технологической и промышленной политики.

Механизмы создания и обеспечения ее эффективности требуют дальнейшего совершенствования. Наибольшее значение эти процессы имеют для России и других развивающихся стран в силу важности определения их роли в мировой экономике и интенсивности экономического развития.

Особая роль в структуре НИС принадлежит обеспечению финансирования инновационной деятельности. Цель данного исследования – дать теоретическое обоснование иерархии функций НИС и роли финансовой составляющей в структуре.

Сущность, принципы и цель деятельности НИС

Инновационное развитие, обусловленное развитием производительных сил, объективно присуще каждой национальной экономике, но на определенной ступени развития оно оформляется в конкретную систему – НИС, действующую по характерным для системы принципам. Системный характер НИС означает, что технологическое развитие представляет собой не цепочку односторонне направленных причинно-следственных связей, ведущих от научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) к инновациям, а процесс взаимодействия и обратных связей всего комплекса экономических, социальных, политических, организационных и других факторов, влияющих на создание, внедрение, коммерциализацию инноваций и финансовое обеспечение этих процессов.

НИС должна быть подчинена основным принципам системы: целостности, выражающейся в единстве и взаимодействии элементов; целенаправленности; оптимальности путем применения наиболее экономичных методов использования ресурсов; иерархичности элементов системы и соподчиненности исходя из цели и задач; взаимосогласованности (координации) действий всех элементов системы; эволюционности развития посредством разработки поэтапной стратегии и др. Эволюционный характер формирования и развития НИС как подсистемы экономической системы обусловлен развитием производительных сил и производственных отношений, а также развития финансовой системы.

НИС принято определять как систему взаимосвязанных институтов, которая включает экономических агентов (предприятия, научные организации, вузы, фонды, инвесторы и т.д.) а также общественные ценности и нормы права и предназначена для создания, хранения и передачи знаний, навыков, определяющих новые технологии.

НИС формируется под влиянием как объективных (наличие природных ресурсов, размер территории и т.д.), так и субъективных факторов (особенности исторического развития институтов государства и форм предпринимательской деятельности, наличие трудовых ресурсов и т.д.). По значимости эти факто-

ры можно разделить на основные (качество человеческого капитала, наличие природных и финансовых ресурсов и т.д.) и вторичные (например, территория страны). Наиболее важным фактором является человеческий капитал, функционирование которого зависит от финансовой поддержки государства и частного бизнеса.

Для каждой НИС характерна определенная структура, степень ее упорядоченности и институциональные связи, причем конфигурация элементов может иметь свои особенности. НИС должна объединять потенциал государства, организаций научно-технической и образовательной сфер, предпринимательского сектора, финансово-кредитной сферы в целях реализации результатов интеллектуальной деятельности на рынке высокотехнологичной наукоемкой продукции.

В таблице обобщены различные точки зрения на сущность НИС с точки зрения ее составляющих и цели, но, по нашему мнению, в них недостаточно внимания уделено источникам ресурсов и процессу финансирования инноваций, без которого невозможна инновационная деятельность.

Автор	Составляющие НИС	Цель НИС
Фримен К. [2, С. 215]	Совокупность институтов в государственном и частном секторах экономики	Стимулирование создания, усовершенствования и распространения новых технологий
Гохберг Л.М. [3]	Система взаимосвязанных институтов	Создание, хранение и передача знаний, навыков, определяющих новые технологии
Васин В.А., Минделли Л.Э. [4, С. 142]	Развивающаяся система социально-экономических отношений между структурами и институтами	Обеспечение хозяйственного развития и роста качества жизни на базе нововведений посредством генерирования, распространения и практического применения инноваций
Организация по экономическому сотрудничеству и развитию [5]	Совокупность государственных, частных и общественных организаций и механизмов их взаимодействия	Создание, хранение и распространение новых знаний и технологий
Сточеван О.А. [6, С. 16]	Совокупность взаимосвязанных организаций, финансовых институтов, инструментов государственного регулирования в пределах национальных границ	Производство и коммерческая реализация научных знаний и технологий
Иванова Н.А. [7, С. 61]	Комплекс взаимосвязанных институтов правового, финансового и социального характера	Производство и коммерческая реализация научных знаний и технологий в пределах национальных границ, обеспечение инновационных процессов
Распоряжение Правительства РФ от 6.07.2006 N 977-р [8]	Совокупность взаимодействующих субъектов и объектов инновационной деятельности	Создание и реализация инновационной продукции и осуществление деятельности в рамках проводимой государством политики

Таблица. Сущность, цель и составляющие национальных инновационных систем

Нами предлагается следующее определение НИС: национальная инновационная система – это эволюционно развивающаяся подсистема национальной экономической системы, представляющая собой совокупность взаимосвязанных субъектов инновационной инфраструктуры и институтов финансового, правового и социального характера, целенаправленно осуществляющих генерацию и трансформацию научных знаний в новые технологии, продукты, услуги, их коммерциализацию и финансирование для реализации экономических интересов.

Стратегической целью формирования НИС является создание организационно-экономической, нормативно-правовой базы для осуществления инновационной деятельности, модернизации производства, используя инвестиционные ресурсы на внедрение высокотехнологичных инноваций. Попытки перехода к инновационному развитию наталкиваются на существенные препятствия: необходимость дополнения производителей знаний и технологий другими необходимыми звеньями инновационного процесса, такими как привлечение и размещения заказов на НИОКР, формирование спроса, продвижение инновации, сопровождение внедрения инновационных решений и их поддержка у заказчика. Нерешенность этих проблем усугубляется падением инновационной активности ведущих секторов экономики [9, С. 166].

Цели НИС определяются национальной инновационной политикой. Достижение цели НИС зависит от уровня развития экономических субъектов – субъектов НИС, их взаимодействия и кооперации, в том числе с финансовыми институтами, при осуществлении инновационной деятельности.

Для этого необходимы:

– разработка стратегии государственной инновационной политики;
– создание законодательной и нормативной базы поддержки инновационной деятельности на государственном уровне и стимулирования ее на частном уровне;
– организация государственного и частного финансово-экономического обеспечения исследований и их внедрения, привлечение инвестиций и их концентрация на приоритетных направлениях;
– обеспечение приоритета науки в инновационном развитии;
– развитие сети организаций, обслуживающих технико-технологический и научный трансфер и коммерциализацию;
– повышение экономической активности субъектов инновационной деятельности.

Основной и обеспечивающий уровни структуры НИС, роль финансовой составляющей

НИС имеет материальную, технико-технологическую, информационную, финансово-экономическую, информационную, организационную, кадровую и правовую составляющие, которые, в зависимости от выполняемых ими функций, можно условно подразделить на два уровня – основной и обеспечивающий, взаимосвязанные и взаимозависимые (рис. 1).

Финансовая составляющая является одной из наиболее важных: она обеспечивает условия осуществления инновационных процессов и позволяет их оценить в стоимостном выражении.

Финансовые ресурсы выполняют следующие функции:

– обеспечение поступлений финансовых средств на различных этапах реализации инновационных процессов;
– создание стимулов и условий для разработки инноваций;
– обеспечение возможности осуществления инновационных процессов;
– воздействие на выбор тематики инновационных проектов в соответствии с потребностями функционирования и развития субъектов НИС;
– содействие эффективному расходованию средств на инновации.

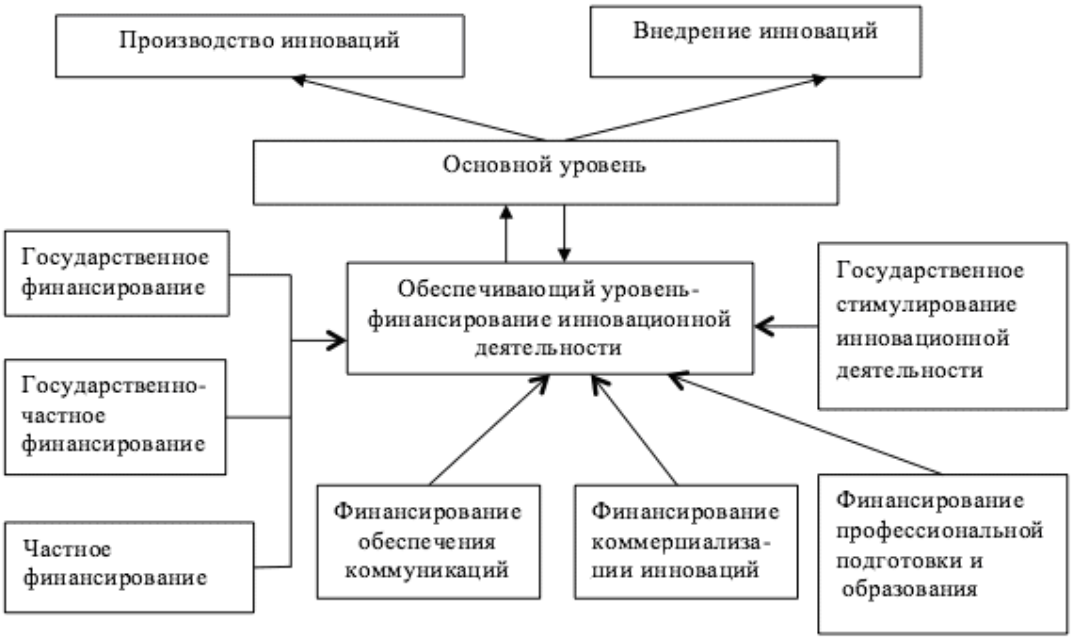


Рис. 1. Функции финансовой составляющей НИС

Создание, производство, внедрение и коммерциализация инноваций неизменно сопровождаются финансированием, которое в условиях российской экономики в основном осуществляется государством и банковским сектором. Степень участия банковского сектора должна зависеть от потребности в финансировании научных разработок, приоритетов государственного регулирования инновационной деятельности, но в настоящее время доминирующим фактором является реализация экономических интересов субъектов, осуществляющих финансирование.

Для определения степени развития НИС применяются различные методики в зависимости от цели и задач анализа; единая методика пока не разработана. По нашему мнению, одним из важнейших показателей является эффективность финансирования инновационной деятельности субъектов НИС, чему способствует координация экономических интересов взаимодействующих субъектов НИС.

Комплекс функций финансовой составляющей НИС должен включать:

– финансирование инновационной деятельности финансово-кредитных учреждений, страховых компаний, венчурных, пенсионных и других фондов;
– финансирование прикладных инновационных разработок;
– развитие венчурного инвестирования;
– финансирование научно-исследовательских, инновационных проектов, опытно-конструкторских и технологических работ;
– финансовое обеспечение лизинга наукоемкого уникального оборудования и приборов;
– оказание финансовой поддержки патентной и изобретательской деятельности, содействие в охране интеллектуальной собственности и поддержании прав на нее в стране и за рубежом;
– финансирование субъектов малого предпринимательства в конкурсах по реализации инновационных программ и проектов за счет государственно-частного партнерства.

Особенности структуры НИС России

По нашему мнению, для Российской Федерации должна быть характерна двухуровневая структура НИС – федеральный уровень и региональные НИС, которые включают предприятия и организации регионального значения и организуют их инновационное развитие (рис. 2). Региональные НИС, испытывая большие проблемы с финансированием инновационной деятельности, в частности, по линии региональных банков, не могут должным образом развиваться.

Недостатком НИС России является разбалансированность целей элементов структуры и некорректное структурирование по горизонтали, что отражает имеющиеся деформации в национальной экономике и характер финансирования инновационной деятельности.

Рис. 2. Структура национальной инновационной системы России

Заключение

Таким образом, инновационное развитие объективно присуще каждой национальной экономике, но оформляется в виде целостной системы, действующей по характерным для системы принципам на определенной ступени развития. НИС, являясь подсистемой экономической системы, должна содействовать целям национальной экономики. Деятельность НИС должна быть организована в соответствии с основными принципами системы: целостность, целенаправленность, оптимальность, иерархичность, координация, эволюционность и др. Формирование НИС происходит эволюционным путем и обусловлено

развитием производительных сил, изменением экономической структуры в пользу высокотехнологичных отраслей, повышением значимости человеческого капитала, сферы образования и укреплением финансово-банковского сектора экономики.

Функции НИС можно подразделить на два взаимосвязанных уровня – основной и обеспечивающий. Ключевая роль в группе обеспечивающих функций принадлежит финансированию, которое заключается в финансировании производства и внедрения инноваций, профессиональной подготовки кадров и образовании, финансовой поддержке обеспечения коммуникаций и коммерциализации, государственном стимулировании инновационной деятельности. Эффективная деятельность НИС возможна в условиях благоприятной инновационной среды при активном финансовом участии частного капитала и целенаправленной государственной финансово-экономической поддержке.

Литература

1. Lundvall B.A. National System of Innovation. Towards the Theory of Innovation and Interactive Learning. – London: Pinter Publishers, 1992. – 388 p.
2. Freeman C. Technology Policy and Economic Performance: lessons from Japan. – London; New York: Pinter Publishers, 1987. – 215 p.
3. Инновационное развитие – основа модернизации экономики России: Национальный доклад / Под ред. Л.М. Гохберга. – М.: ИМЭМО РАН. ГУ-ВШЭ, 2008. – 168 с.
4. Васин В.А., Миндели Л.Э. Национальная инновационная система: предпосылки и механизмы функционирования. – М.: ЦИСН, 2002. – 363 с.
5. Организация экономического сотрудничества и развития. Обзор инновационной политики Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Центр гуманитарных технологий. URL: http://gtmarket.ru/state/2011/05/30/2956, свободный, Яз. рус. (дата обращения 19.09.2013).
6. Сточеван О.А. Приоритеты и предпосылки формирования национальной инновационной системы: Препринт. – СПб: Изд-во СПбГУЭФ, 2005. – 16 с.
7. Иванова Н. Национальные инновационные системы // Вопросы экономики. – 2001. – № 7. – С. 59–71.
8. Распоряжение Правительства РФ от 06.07.2006 № 977-р «О Концепции Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы».
9. Абрамова Е.Ю. Роль технопарков в развитии России как инновационного общества // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2 (72). – С. 166–169.

Красноперова Танзиля Яуфатовна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат экономических наук, доцент, krasntat@mail.ru

12 НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

УДК 378.046.4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГРАММ ПОДГОТОВКИ МЕНЕДЖЕРОВ ПО ПЕРСОНАЛУ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТИЛЕЙ ОБУЧЕНИЯ

Е.А. Карпова

Рассматривается проблема оптимизации процесса обучения взрослых людей. Проведен теоретический анализ ключевых индивидуально-психологических особенностей, оказывающих влияние на восприятие транслируемых знаний в процессе обучения. Рассматриваются модели Э.К. Линдемана, Д. Колба, К. Роджерса, позволяющие создать новые условия для лучшего усвоения знаний. Показано, что образование взрослых слушателей существенно отличается от подготовки молодых специалистов. Отмечено, что при планировании программ обучения целесообразно учитывать различные стили обучения слушателей. Доминирующий стиль обучения слушателя определяет особенности процесса обучения и реакцию человека на определенные методы и усилия преподавателя. Приведены результаты комплексного исследования, целью которого явилось определение наилучших организационно-педагогических условий обучения менеджеров по персоналу. Общая выборка составила 135 человек, продолжительность программы обучения – 540 часов. Проанализированы результаты и сделаны выводы о целесообразности использования интерактивных методов обучения. Корреляционный анализ показал, что использование данных методов обучения образует положительные взаимосвязи с развитием таких показателей управленческого потенциала, как углубленное понимание управленческого труда, умение обучать и решать ситуационные проблемы, возникающие в процессе управления персоналом.

Ключевые слова: образование взрослых, профессиональная подготовка, стиль обучения.

Введение

В настоящее время потребности социально-экономической практики определяют значимость высокого уровня профессионализма каждого человека в постоянно изменяющихся условиях. Решение этой задачи способно содействовать развитию его профессионально-личностных качеств и повышению эффективности его профессиональной деятельности. В этой связи следует признать своевременным обращение к проблеме обучения на протяжении всей жизни, а именно, совершенствование программ подготовки менеджеров по персоналу с учетом индивидуально-личностных особенностей обучающихся.

В мировом менеджменте постоянная интенсивная профессиональная подготовка позволяет человеку успешно решать задачи в условиях постоянных изменений, происходящих в обществе. Одним из условий эффективного менеджмента в области управления персоналом является способность специалистов к целостному видению процесса управления человеческими ресурсами, соединяющего в себе стандартизированные организационные технологии, а также закономерности понимания поведения отдельного человека и группы, возможность творчески мыслить и адаптироваться к любым ситуациям. Вместо простых форм трансляции знаний от преподавателя к слушателю приоритетной формой обучения становится развитие умений находить нужную информацию для решения любых сложных задач. Цель настоящей работы – определить предпочитаемый стиль обучения слушателей для последующего выбора оптимальных для восприятия методов обучения, используемых в образовательных программах.

Теоретический анализ

Образование взрослых имеет ряд особенностей. Взрослый человек обладает достаточным уровнем самосознания, жизненным опытом, пониманием цели обучения и путей реализации полученных знаний, умений, навыков, личностных качеств и ценностных ориентаций, наконец, достаточно высоким уровнем ответственности, чтобы активно и реально участвовать в диагностике своих образовательных потребностей, в планировании, создании благоприятных условий обучения, оценивания и коррекции учебного процесса [1]. В связи с этим целесообразно провести теоретический анализ ключевых индивидуально-психологических особенностей, оказывающих влияние на восприятие транслируемых знаний в процессе обучения. Научная новизна работы заключается в том, что в данной работе сделана попытка систематизировать научные подходы к понятию «стиль обучения», показана специфика усвоения знаний в обучении взрослых людей.

Взрослые уже обладают практически необходимыми знаниями, позволяющими решать проблемы в разных сферах деятельности, и поэтому они практически не ощущают необходимости выйти за пределы сложившегося жизненного и профессионального опыта. Опыт позволяет им классифицировать явления, «подсказывает» решения возникающих задач. Таким образом, до определенного момента взрослому человеку достаточен имеющийся у него социальный запас знаний. «До тех пор, пока мое знание действует безотказно, я отбрасываю всякие сомнения по его поводу» [2].

В настоящее время в сфере образования взрослых существует потребность в оптимизации процесса обучения. Начиная с 80-х годов XX в., исследователи в области зарубежной психологии (H. Witkin, R. Gardner, D. Kolb, L. Curry, J. Kagan, P. Honey, A. Mumford, D. Wardell, J. Royce, R. Sternberg) обратили внимание на изучение когнитивных стилей, отражающих индивидуальную специфику интеллектуальных процессов. Более того, удалось создать некоторые модели, опираясь на которые, можно совершенствовать процесс обучения.

Анализ опыта обучения взрослых позволил американскому исследователю Э.К. Линдеману сформулировать несколько ключевых особенностей, заложивших фундамент теории обучения взрослых.

1. Мотивация – отправной пункт в организации обучения взрослых.
2. Жизненные ситуации – учебная ориентация взрослых направлена на решение жизненных проблем, поэтому подходящими единицами для организации обучения выступают не учебные предметы, а конкретные события.
3. Опыт – богатейший ресурс обучения взрослых, поэтому центральный метод образования – анализ опыта.
4. Роль преподавателя, обучающего взрослых, заключается в том, чтобы вместе с ними заниматься процессом исследования, а не транслировать свои знания, а затем оценивать их усвоение.
5. Разнообразие стилей, времени и темпа обучения – с годами индивидуальные различия между людьми усиливаются, поэтому образование взрослых должно обеспечивать различные подходы к обучающимся [3].

Д. Колб (David A. Kolb) оптимизировал процесс обучения. Для этого он объединил сильные стороны бихевиористской и когнитивной моделей обучения. От бихевиористского подхода использована ориентация на изменение поведения путем выработки новых навыков и совершенствование имеющихся. От когнитивного подхода – ориентация на развитие и совершенствование сознания, а также учет мотивационной системы учащихся [4].

При обучении взрослых людей особую популярность приобрела циклическая четырехступенчатая эмпирическая модель процесса обучения и усвоения человеком новой информации (Experiential Learning Model). В ходе проведенных экспериментов было обнаружено, что люди обучаются одним из четырех способов: через опыт, через наблюдение и рефлексию, с помощью абстрактной концептуализации или с помощью активного экспериментирования, отдавая одному из них предпочтение перед остальными. При этом обучение состоит из повторяющихся этапов «выполнения» и «мышления». Это значит, что эффективно научиться, просто читая о чем-то, изучая теорию или слушая лекции, невозможно. С другой стороны, не может быть эффективным и обучение, в ходе которого новые действия выполняются бездумно, без анализа и подведения итогов.

Стадии модели (или цикла) Д. Колба могут быть представлены следующим образом:

1. получение непосредственного опыта;
2. наблюдение, в ходе которого обучающийся обдумывает то, что он только что узнал;
3. осмысление новых знаний, их теоретическое обобщение;
4. экспериментальная проверка новых знаний и самостоятельное применение их на практике [5].

Этот новый подход к обучению предполагает рассматривать обучающихся в качестве полноправных участников процесса обучения. Преподаватель и обучающиеся становятся не только равноправными участниками, но и партнерами, влияющими друг на друга и выполняющими отведенные им роли. Можно предположить, что обучающиеся характеризуются различной степенью готовности к активному участию в процессе обучения и различной степенью мотивации совершенствования собственной квалификации. Исходя из этого, данный подход к организации обучения изменяет требования к программам, которые должны быть нацелены на создание таких условий, при которых каждый участник занятий сможет максимально полно раскрыть свой потенциал.

К. Роджерс выделяет два типа обучения: информационное, обеспечивающее простое знание фактов, и значимое учение, дающее обучающимся действенные знания, необходимые им для самоизменения и саморазвития [6]. Такой вид обучения предполагает знание стиля обучения, который будет способствовать более полному усвоению знаний. В современной литературе предлагается множество определений понятия «стиль обучения». Как правило, это условия, при которых человек начинает концентрироваться на новой информации, усваивать, обрабатывать и запоминать ее. При этом стиль отражает общие различия в подходах к учебе в зависимости от того, в какой степени люди выделяют каждую из четырех моделей процесса обучения, что оценивается с помощью теста самооценки «Определение стиля учения».

Развивая идеи Д. Колба, английские ученые П. Хоней и А. Мамфорд (P. Honey & A. Mumford), описали различные стили обучения. Кроме этого, они разработали тест для выявления предпочитаемого стиля обучения (Honey Mumford Preferred Learning Style Test).

Согласно этой концепции, люди делятся по предпочитаемому стилю обучению на четыре типа – деятельный, рефлектирующий, теоретический, прагматический [7]. Коротко охарактеризуем эти типы.

1. **Рефлектирующий тип.** Предпочитают тщательный сбор и анализ информации. Для данной категории оптимальны следующие условия обучения: существует возможность контролировать темп обучения, процесс обучения не имеет жестких сроков, имеется достаточно времени на подготовку, есть возможности осмысления происходящего и подведения итогов обучения, а также трудоемких исследований.
2. **Деятельный тип.** Получают удовольствие от решения задач, требующих максимального напряжения. Однако они не всегда готовы к завершению задачи. Наилучшими условиями обучения являются условия, при которых существует широкий диапазон задач, которыми можно заняться, и возможностей для их решения. Обучающиеся отвечают за выполнение задания, которое воспринимается ими как сложное, предоставляется свобода генерировать идеи, имеется возможность организовывать других обучающихся.
3. **Теоретический тип.** Интегрируют и адаптируют факты и свои наблюдения в сложные и логически стройные теории. Их склонность к системному мышлению выражается в стремлении исследовать базовые теоретические положения, принципы и модели. Обучаются лучше при следующих условиях: четко обозначена структура, цели и задачи обучения, есть время на логическое построение идей, событий и ситуаций; имеет место ситуация интеллектуального напряжения, при которой им приходится использовать свои навыки и знания; материал укладывается в их логическую схему.
4. **Прагматический стиль.** Отличительными чертами прагматиков является возможность испытывать новые теории и методы на практике. Эффективность обучения повышается при следующих условиях: предметом исследования является то, что имеет практическую пользу и значение, можно быстро воплотить в жизнь полученные знания и навыки. Программа обучения предусматривает проведение экспериментов, практических заданий и консультаций с квалифицированными практикующими специалистами.

Люди, предпочитающие тот или иной стиль в «чистом» виде, встречаются достаточно редко. Как правило, у каждого обучающегося более или менее представлены элементы всех стилей. Но все-таки именно доминирующие тенденции определяют и особенности процесса обучения и реакцию человека на определенные методы и на усилия преподавателя. В каждом отдельном случае можно выстроить профиль, определяющий значимость каждого стиля в совокупности с другими.

Исследование наилучших организационно-педагогических условий обучения

В 2012–2013 г.г. было проведено комплексное исследование, целью которого явилось определение наилучших организационно-педагогических условий подготовки менеджеров по персоналу на кафедре управления и права НИУ ИТМО. Общая выборка составила 135 человек из числа обучающихся на курсах по специальности «Менеджер по персоналу». Продолжительность программы обучения составляет 540 часов.

На первом этапе исследования был проведен опрос, в качестве инструмента опроса использовалась авторская анкета. Анкета предусматривала получение информации о наиболее актуальных программах, направлениях обучения, методах и формах, используемых в образовательном процессе. На втором этапе с помощью теста П. Хоней и А. Мамфорда (Е.С. Яхонтова, 1992) была определена значимость каждого стиля обучения. На третьем этапе исследования с помощью методики «Ограничения управленческого потенциала» М. Вудкока и Д. Френсинса были выявлены слабые и сильные стороны управленческих возможностей будущих менеджеров по персоналу.

В результате проведенного исследования были получены следующие результаты. Во-первых, мы определили, что главным в получении дополнительного образования являются знания, которые можно применить на практике – 47,5%, вместе с тем 44,2% рассматривают данное образование как еще один шаг в своей карьере. В будущем большинство респондентов, а именно 81,3%, планирует продолжить обучение. Так, вопросы психологии интересны для 35% слушателей, менеджмент и конфликтология привлекают внимание 30% слушателей, а экономика и валеология – 8% слушателей. Респонденты весьма высоко оценивают общий теоретико-методологический и профессионально-практический уровень профессорско-преподавательского состава. Средняя оценка по 10-балльной шкале составляет 9,1 балла.

Респондентам было также предложено определить рейтинг наиболее значимых для них методов обучения. Наиболее актуальными методами обучения являются лекции – 6,5 балла, тренинги – 5,6 балла, деловые игры – 5,0 балла, семинары – 3,7 балла, индивидуальные встречи с практикующими специалистами – 3,9 балла. Наименьшую популярность имеет процесс самообучения – 1,7 балла, а также участие в конференциях – 2,0 балла. Низкие оценки объясняются некоторыми трудностями, которые испытывают слушатели, овладевая новой для них профессией.

На вопрос «Какое образование для Вас важнее?» ответы распределились следующим образом: узкоспециализированное образование – 14,3%; разностороннее образование – 45,8%; академическое (теоретическое) образование – 18,8%; экспериментальное образование – 19,6%.

В процессе анализа средних показателей управленческого потенциала обучающихся по специальности «Менеджер по персоналу» были выявлены наиболее сильные, значимые стороны, а также ограничения управленческого потенциала. Ограничениями управленческого потенциала являются проблемы творческого подхода (*F*=6,24), невысокая способность управлять собой (*A*=6,21) и недостаточно высокие навыки решения проблем (*E*=7,01). Вместе с тем, достаточно отчетливо выражен такой показатель, как умение обучать других (*J*=8,24), что весьма важно для данной категории специалистов. Это обусловлено тем, что около 20% слушателей имеют базовое педагогическое или психологическое образование, а некоторые слушатели – конкретный опыт работы в данной сфере.

Исследование стилей обучения позволило получить результаты, которые представлены в табл. 1.

Стили обучения	Значения (баллы)	%
Деятельный	11,56	22,4
Рефлексивный	16,71	32,4
Теоретический	14,14	27,5
Прагматический	9,15	17,7

Таблица 1. Средние показатели по стилям обучения

Полученные результаты определяют рефлексивный стиль обучения для данной группы респондентов как приоритетный (32,4%). Это означает, что процесс обучения должен базироваться на проведении интерактивных занятий в форме тренинга или деловых игр. Вместе с тем следует отметить, что теоретический стиль обучения прочно занимает второе место (27,5%). Слушателям необходимы новые знания, и получать эти новые знания они хотят в традиционной форме, а именно в виде лекций. На третьем месте находится деятельный стиль обучения (22,4%). Этот показатель демонстрирует готовность респондентов к самостоятельной экспериментальной работе на основе полученных знаний. На четвертом месте – обучение через практическую деятельность (17,7%).

Анализируя взаимосвязи показателей управленческого потенциала и стилей обучения, представленные в табл. 2, можно отметить, что понимание особенностей управленческого труда (*H*) определяется теоретическими знаниями в этой области и глубоким рефлексивным анализом полученной информации. Хорошие навыки решения проблем (*E*) и умение обучать (*J*) зависят от систематизированного поиска и анализа информации.

	Рефлексивный стиль	Теоретический стиль
E	0,45	
H	0,55	0,47
J	0,57	

Таблица 2. Извлечения из матрицы корреляций основных показателей управленческого потенциала и стилей обучения (p <0,01): *E* – хорошие навыки решения проблем, *H* – понимание управленческого труда, *J* – умение обучать

Анализируя направления, в которых будущие менеджеры по персоналу планируют совершенствоваться, можно подчеркнуть два наиболее перспективных из них – совершенствование в вопросах решения проблем, возникающих в процессе деятельности организации, и развитие творческого подхода (табл. 3). Развитие психологических качеств, несомненно, позволит внести творческий аспект в управленческую деятельность.

Показатели	А 11.3	А 11.4	А 11.5	А 11.9	А 11.12
Способность управлять собой (*A*)		0,34			
Продолжающиеся саморазвитие (*D*)			0,33		
Хорошие навыки решения проблем (*E*)	0,36				
Творческий подход (*F*)					0,36
Понимание особенностей управленческого труда (*H*)					0,33

Таблица 3. Извлечения из матрицы корреляций показателей управленческого потенциала и направлением обучения (p< 0,01): А 11.3 – планирование и организация деятельности; А 11.4 – технологии управления конфликтами; А 11.5 – мотивация персонала; А 11.9 – стресс-менеджмент; А 11.12 – психология

Кроме этого, был проведен анализ отдельных программ, включенных в систему подготовки менеджера по персоналу – «Персонал-технологии» и «Диагностика персонала».

Программа «Персонал-технологии» включает в себя следующие формы и методы обучения: деловые игры – 42,5%, теоретический материал – 35,7%, практические задания – 12,4%, конкретные ситуации – 9,4%. В то же время программа «Диагностика персонала» основана в большей степени на практических

заданиях. Их доля составляет – 35,8%. Теоретический материал составляет – 15,5%, а интерактивные методы обучения занимают 18,3%. Это способствует более быстрому практическому усвоению новых методов диагностики персонала.

Если сопоставить полученные результаты, то отклонение от оптимальной программы обучения небольшое, оно составляет в среднем всего 6,1%.

Заключение

В ходе исследования были определены условия оптимального восприятия транслируемых знаний, на основе которых следует формировать учебные программы. В связи с тем, что приоритетным стилем обучения для респондентов является рефлексивный стиль, основное внимание при подготовке программ обучения следует акцентировать на интерактивных формах обучения, таких как тренинговые упражнения, деловые и ролевые игры. Корреляционный анализ показал, что использование данных методов обучения образует положительные взаимосвязи с развитием таких показателей управленческого потенциала, как углубленное понимание управленческого труда, умение обучать и решать ситуационные проблемы, возникающие в управлении персоналом. Кроме того, по результатам проведенного анализа программ обучения можно сказать, что они разработаны таким образом, который в конечном итоге позволит свести к минимуму проблемы восприятия и усвоения знаний. На основе полученных результатов можно построить и профиль предпочитаемых стилей обучения. В этом случае мы получим «поле», в рамках которого можно органично использовать более широкий спектр методов обучения.

Более глубокое изучение проблемы требует привлечения результатов дополнительных исследований в данной области знания. Это дало бы возможность более обоснованно судить о формировании оптимальных образовательных технологий для взрослых людей. Тем не менее, проведенное исследование делает еще один шаг в изучении роли образования для профессиональной самореализации человека.

Литература

1. Змеев С.И. Образование взрослых и андрагогика в России: достижения, проблемы и перспективы развития // Педагогика. – 2009. – № 7. – С. 32–33.
2. Бергер П., Лукман Т. Социальное конструирование реальности. Трактат по социологии знания. – М.: Медиум, 1995. – 323 с.
3. Lindeman E. The Meaning of Adult Education. – New York, Republic, 1970. – 266 p.
4. Kolb D. Learning Style Inventory. – USA: McGRAW-HILL, 1985. – 124 p.
5. Kolb A.Y., Kolb D.A. The Learning Way: Metacognitive Aspects of Experiential Learning // Simulation & Gaming, 2009. – V. 40. – № 3. – P. 297–327.
6. Rogers C.R., Freiberg H.J. Freedom to Learn. – 3-rd ed. – New York – Oxford – Singapore – Sydney: Maxwell Macmillan International, 1994. – 406 p.
7. Honey P. & Mumford A. Manual of Learning Styles. – London: Publications, 1988. – 342 p.

Карпова Елена Алексеевна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат психологических наук, доцент, dr.karpova@mail.ru

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 628.9, 681.78

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Е.В. Горбунова, В.В. Коротаев, В.С. Перетягин

Приведены результаты работ по созданию автоматизированного аппаратно-программного комплекса для контроля и аттестации параметров и характеристик многоэлементных источников излучения на основе излучающих диодов. Представленный комплекс предназначен для одновременного определения спектральных характеристик и цветовых параметров источников оптического излучения в трехмерном пространстве, а также равномерности освещения или облучения зоны анализа в диапазоне длин волн 200–1100 нм.

Ключевые слова: источник оптического излучения, светодиод, многоэлементный источник излучения, контроль параметров.

Разработки в области технологий освещения занимают одну из ведущих позиций в сфере инноваций. Новейшие системы освещения, в частности, светодиодные, актуальны и востребованы по причине малого энергопотребления и длительных сроков службы, что выгодно отличает их от традиционных источников света. Большой интерес к светодиодам и излучающим диодам (ИД) вообще обусловлен также широкими возможностями по созданию на их основе специализированных устройств подсветки (с требуемыми спектром, интенсивностью, диаграммой направленности, цветом излучения), в том числе управляемых. Однако создание высококачественных и функциональных многоэлементных устройств освещения невозможно без обеспечения тщательного контроля за их параметрами и характеристиками [1]. Существует немало различных систем и устройств, подобных описанным в [2–4], предназначенных для исследования и аттестации параметров источников оптического излучения (ИОИ), однако ни одно из них не позволяет осуществлять одновременный анализ пространственного распределения освещенности, цветовых и спектральных характеристик излучения в трехмерном пространстве, а также параметров питания ИОИ.

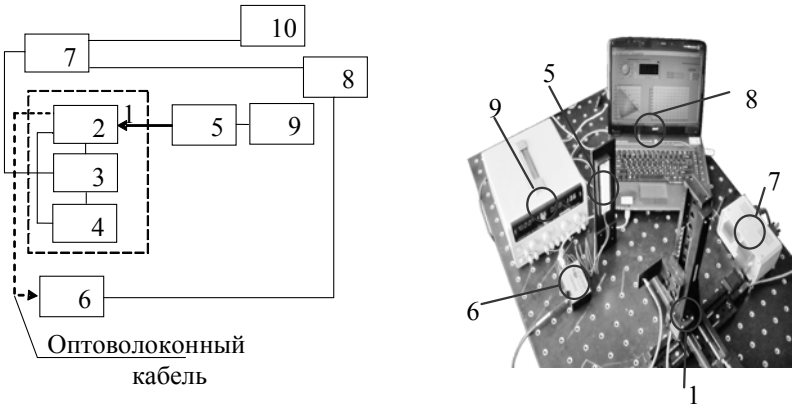
Коллективом кафедры оптико-электронных приборов и систем НИУ ИТМО разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) для одновременного определения спектральных характеристик и цветовых параметров ИОИ (как одно-, так и многокомпонентных) в трехмерном пространстве, а также равномерности освещения (для ИОИ видимого диапазона спектра) или облучения (для ИОИ ультрафиолетового и инфракрасного диапазонов спектра) зоны анализа. Отличительными особенностями, научной новизной и достоинствами предложенного решения АПК являются:

- возможность оценки параметров и характеристик ИОИ в любой точке поля их излучения при реализации трехкоординатного сканирования пространства с шагом 1 мм за счет использования трех линейных трансляторов;
- одновременное определение цветовых параметров ИОИ и спектрального состава излучения в диапазоне длин волн 200–1100 нм, а также возможность оценки равномерности освещения или облучения зоны анализа размером 200×200 мм^2 за счет использования малогабаритного оптоволоконного спектрометра;
- возможность визуализации получаемых характеристик и параметров за счет обработки измеряемых величин с помощью оригинального программного обеспечения, работающего в среде LabVIEW.

Внешний вид прибора и его структурная схема представлены на рис. 1. АПК позволяет представить полученную информацию в виде, удобном для оценки и аттестации (рис. 2 – главное окно). Пользователю представляется информация о положении сканирующего устройства в данный момент, координата цвета. Строится карта цветов (распределение цвета по всему сканирующему полю), спектральная характеристика, трехмерная модель равномерности освещения или облучения и распределение освещения в плоскости XY. Основными входными параметрами для запуска АПК являются границы исследуемого поля излучения и шаг сканирования, выходными – спектр (и его изменение по полю), распределение цветовых координат, а также характеристика равномерности освещения заданной плоскости (области пространства) исследуемым источником. Результаты работы могут использоваться при разработке и контроле качества ИОИ, излучающих в спектральном диапазоне 200–1100 нм, с размерами излучающей поверхности не более 200×200 мм^2:

- ламповых источников излучения;
- многоэлементных источников излучения (линейных, круговых и т.д.) для высокоточных оптико-электронных систем;
- адаптивных (меняющих спектральные и цветовые характеристики) источников освещения [5], которые могут быть использованы, например, при цветовом анализе различных объектов.

Основной отличительной особенностью разработанного прибора от существующих аналогов является одновременное определение цветовых параметров ИОИ и спектрального состава излучения, а также возможность оценки равномерности освещения или облучения.



а б

Рис. 1. Установка для измерения параметров и характеристик светодиодных источников излучения: структурная схема (а), внешний вид (б). 1 – измерительный стенд; 2–4 – моторизованный линейный транслятор; 5 – исследуемый источник оптического излучения; 6 – приемник оптического излучения (спектрометр); 7 – блок обработки и управления; 8 – персональный компьютер; 9 – блок питания источника оптического излучения; 10 – источник питания для блока обработки и управления

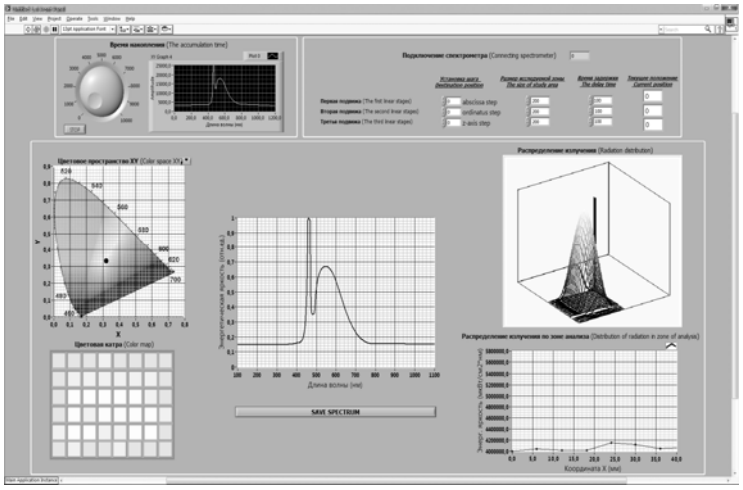


Рис. 2. Вид главного окна программного комплекса

Работа выполнена в рамках НИР № 610480 «Исследование в области создания систем спектральной ОКТ и оценка возможностей их применения» НИУ ИТМО.

1. Горбунова Е.В., Коротаев В.В., Перетягин В.С., Чертов А.Н. Моделирование многокомпонентного источника излучения // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – № 5. – С. 31–33.
2. Никифоров С. Измерительная лаборатория для комплексного исследования характеристик светодиодов, применяемых в системах отображения информации // Компоненты и технологии. – 2007. – № 7. – С. 170–175.
3. Кузьмин В., Антонов В., Круглов О. Приборы для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 3. – С. 26–31.
4. Вакуленко А.Д., Горбунова Е.В., Перетягин В.С., Чертов А.Н. Установка для измерения и контроля параметров и характеристик светодиодов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4 (80). – С. 158–159.
5. Chertov A., Gorbunova E., Korotaev V., Serikova M., Peretyagin V. Simulation of the multicomponent radiation source with the required irradiance and color distribution on the flat illuminated surface // Proc. SPIE. – 2012. – № 8429. – P. 84290D.

Горбунова Елена Васильевна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, научный сотрудник, gorbunova@grv.ifmo.ru

Коротаев Валерий Викторович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, korotaev@grv.ifmo.ru

Перетягин Владимир Сергеевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, peretyagin@mail.ru

УДК 004.925.4

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИ СЖИМАЕМЫХ ТЕКСТУР

И.В. Перминов

Описывается модель работы с текстурами, основанная на механизме представлений (Texture Views). Рассматриваются ограничения современных программных интерфейсов Direct3D 11.2 и OpenGL 4.4 при работе с текстурами, предлагается метод повышения эффективности обработки сжатых текстур путем исключения этапа копирования данных между буферами сжатого и несжатого типов. Приводятся результаты профилирования тестового приложения, осуществляющего динамическое сжатие текстур на каждом кадре.

Ключевые слова: сжатие текстур, Direct3D, OpenGL.

Текстуры повсеместно применяются в трехмерной компьютерной графике и в простейшем случае представляют собой двухмерное изображение, накладываемое на трехмерную поверхность с целью улучшения визуальной детализации без усложнения геометрии. При этом в современных интерактивных приложениях текстуры занимают более половины используемого объема видеопамяти [1]. Одним из эффективных вариантов повышения производительности и снижения требований к подсистеме памяти является использование предварительно сжатых текстур. Они хранятся в памяти, передаются по шинам в сжатом виде и распаковываются аппаратно внутри графического процессора. Это позволяет сэкономить один из наиболее важных ресурсов графического ускорителя – пропускную способность видеопамяти.

С ростом сложности систем визуализации все чаще начинают применяться динамически генерируемые визуальные данные и текстуры. Примером может служить карта окружения, которая обновляется на каждом кадре и используется для визуализации зеркальных поверхностей. Как правило, для таких текстур сжатие не используется ввиду сложности алгоритма сжатия и ограничений как самих графических процессоров, так и программных интерфейсов.

Для работы с текстурами современные программные интерфейсы Direct3D 11.2 [2] и OpenGL 4.4 [3] предлагают модель, позволяющую разделить описание буфера текстуры (Texture), хранящего данные, и представление (View), определяющее тип и доступ к этим данным. Это позволяет, к примеру, одни и те же данные интерпретировать как целочисленные в одной ситуации и как числа с плавающей запятой – в другой. При этом вводятся ограничения на возможные преобразования типов и операции с текстурными буферами. В частности, запрещается отрисовка в текстурный буфер сжатого формата, любое преобразование типов, имеющих разный размер текселя в битах, а также преобразование между любыми сжатыми и несжатыми типами.

Применительно к процессу динамического сжатия текстур это означает, что результат работы фрагментного шейдера не может быть записан в тот же самый буфер, из которого можно будет считывать текстурные данные с использованием аппаратного декодера. Таким образом, даже если шейдер может сформировать уже сжатый блок, он не сможет записать его в текстурный буфер, имеющий сжатый тип. По этой причине при сжатии текстур силами шейдера необходимо записывать сжатые блоки в буфер несжатого типа «под видом» текселей, а затем копировать полученные данные в буфер сжатого типа. При этом размер текселей в битах в промежуточном буфере должен совпадать с размером сжатого блока.

Для оценки затрат на копирование текстурного буфера были произведены тесты с использованием графического адаптера AMD Radeon 7970. В тестовой сцене на каждом кадре сжималась текстура размером 1024×1024 в формат DXT1 (соответствует типу DXGI_FORMAT_BC1_UNORM в Direct3D и типу COMPRESSED_RGB_S3TC_DXT1_EXT в OpenGL), и на экран выводились объекты с использованием сжатой текстуры. Профилирование показало, что формирование одного кадра занимает 170 мкс, из которых 14 мкс приходится на копирование текстурного буфера. При этом время отрисовки одного объекта тестовой сцены при использовании сжатых текстур падает с 45 мкс до 34 мкс.

Суть предлагаемого метода заключается в изменении процесса динамического сжатия текстур путем исключения копирования данных между буферами хранения сжатого и несжатого типов. Расширение функционала представлений текстур позволило бы использовать всего один буфер и полностью исключить этап копирования без увеличения затрат на другие операции при формировании кадра. Однако простого снятия ограничения на преобразование сжатого типа текстур к несжатому недостаточно, так как при записи буфер должен интерпретироваться как текстура с размером текселя, равным размеру одного сжатого блока, а при чтении – как текстура с более высоким разрешением и текселем, соответствующим одной точке сжатой текстуры. Однако существующий механизм текстурных представлений предполагает неизменность размеров текселя.

Возможным решением в данном случае является введение дополнительных функций, позволяющих создавать перекрывающиеся буферы. Альтернативным вариантом в случае OpenGL является модификация функции TextureView с учетом возможных изменений разрешения, создаваемого представления. Дополнительно подобные изменения позволили бы в шейдере напрямую производить частичные обновления сжатой текстуры на уровне блоков, что, к примеру, сделало бы возможным выполнение компоновки нескольких фрагментов в одну сжатую текстуру (compositing).

Предлагаемый метод позволит сократить время сжатия и повысить гибкость при работе со сжатыми текстурами. Таким образом, эффективность обработки сжатых текстур можно повысить, ликвидировав этап копирования данных между буферами сжатого и несжатого типа. Однако это потребует изменения программных интерфейсов Direct3D и OpenGL, а также драйверов графических адаптеров.

1. McDonald J. Eliminating Texture Waste: Borderless Ptex // NVIDIA Corporation, 2013 – 1 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://developer.nvidia.com/sites/default/files/akamai/gamedev/docs/Borderless%20Ptex.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 08.08.2013).
2. Direct3D 11 Graphics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ff476080(v=vs.85).aspx, свободный. Яз. англ. (дата обращения 08.08.2013).
3. OpenGL 4.4 Core Specification [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.opengl.org/registry/doc/glspec44.core.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 08.08.2013).

Перминов Илья Валентинович **–** Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, i.am.perminov@gmail.com

SUMMARY

REVIEW ARTICLE

INFRARED TOMOGRAPHY OF HOT GAS: MATHEMATICAL MODEL OF ACTIVE-PASSIVE DIAGNOSIS

V. Sizikov

Basic problems of IR tomography of a hot gas on the example of a burner flame are formulated. The variant of two flame diagnosis regimes application is described: the active one (ON) – with included translucent source and the passive one (OFF) – without such source. Two integral equations are deduced concerning the absorption coefficient *k* and the Planck function *B* of a medium (by which it is possible to calculate the temperature profile of a medium T_g). In the case of axial symmetry and parallel scanning of flame, the equations are transformed into one-dimensional singular integral equations of Abel's type concerning *k* and *B*. For its numerical solving, the generalized quadrature method, data smoothing by splines and the Tikhonov regularization method are used. The software package for MatLab7 is developed. Experimental diagnosis results of the burner flame for some wave number ν in some flame cross-section were processed by means of MatLab7. Specific feature of the proposed technique is that it does not require a determination of *k* by a special measuring or through a database, for example, the HITRAN/HITEMP. The review is intended for students, postgraduate students, lecturers and scientific researches specializing in tomography, integral equations, ill-posed problems, applied mathematics and programming.

Keywords: IR tomography, active and passive diagnosis regimes, absorption coefficient, temperature profile, integral equations, axial symmetry, parallel scanning.

Valery Sizikov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor; St. Petersburg State Polytechnic University Institute of International Educational Programs, Professor, sizikov2000@mail.ru

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

INVESTIGATION OF OUTPUT SIGNAL AMPLITUDE DEPENDENCE IN HOMODYNE DEMODULATION SCHEME FOR PHASE FIBER-OPTIC SENSOR

M. Plotnikov, A. Kulikov, V. Strigalev

The method of homodyne demodulation is widely used in interferometer fiber optic sensors. The paper deals with modeling results of output signal amplitude dependence on the amplitude of the measured phase-shift signal and phase modulation depth at the carrier frequency. Optimal phase modulation depth at the carrier frequency, which corresponds to the maximum value of the output signal, is defined as C=2.373 rad. Nonlinear character of the amplitude dependence of the output signal on the amplitude of the measured phase-shift signal is shown for the first time. Detailed mathematical analysis of obtained dependencies is given, which shows the opportunity for increasing of the linear part of the homodyne demodulation scheme amplitude response by widening the low-pass filter passband, favoring the input signal dynamic range increase. According to received results, for the measured phase-shift signal at frequency 500 Hz, low-pass passband increasing from 500 Hz to 1500 Hz leads to increasing of the size of the amplitude response linear part from 1.1 rad to 2.9 rad, i.e. input signal dynamic range increases up to 8.42 dB. Mathematical method of optimal low-pass passband calculating is proposed, providing the linearity of the demodulation scheme amplitude response in the specified range of input impact.

Keywords: fiber-optic interferometer sensor, homodyne demodulation, phase modulation.

Mikhail Plotnikov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer-researcher, plotnikov-michael@yandex.ru

Andrey Kulikov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, a.kulikov86@gmail.com

Vladimir Strigalev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, PhD, Associate professor, vstrglv@mail.ru

DEPENDENCE INVESTIGATION OF THE ANISOTROPIC SINGLE-MODE FIBER PARAMETERS ON A WINDING DIAMETER

S. Aksarin, S. Arkhipov, S. Varzhel, A. Kulikov, V. Strigalev

Experimental setup has been designed that makes it possible to measure linear losses in optical fibers by the insertion loss method and *h*-parameter in anisotropic single-mode optical fibers by crossed polarizer method. The dependence of the single-mode anisotropic optical fiber linear optical loss and *h*-parameter on a winding diameter has been investigated. In the experiment, the winding diameter was changed with increment of 2.5 mm at a range of diameters from 3 to 50 mm and with increment of 0.5 mm at a range of diameters from 3 mm to 10 mm. The

investigation has been carried out for the birefringent optical fibers with elliptical stressed core and GeO_2 doping concentration of 4, 12 and 18 mol. %. On the base of analysis results recommendations for the allowable bending diameter of anisotropic single mode optical fibers used in interferometer fiber-optical sensors have been made. The measured parameters are the average values for the bent portion as control of even distribution of mechanical stress and spatial orientation of the elliptical shell in the samples during the present experiment was not carried out.

Keywords: anisotropic single-mode optical fiber, winding, optical losses, h-parameter.

Stanislav Aksarin – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, oskar2002@list.ru

Sergey Arkhipov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, thinkingcreature@yandex.ru

Sergey Varzhel – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, scientific researcher, PhD, vsv187@gmail.com

Andrey Kulikov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, a.kulikov86@gmail.com

Vladimir Strigalev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, PhD, Associate professor, vstrglv@mail.ru

PHASE CHARACTERISTIC STABILIZATION OF THE FIBER-OPTICAL SENSOR SIGNAL IN TERMS OF TEMPERATURE CHANGE

A. Aleynik, I. Deineka, A. Makarenko, M. Mekhrengin, V. Strigalev

Software simulation of the phase characteristic of fiber-optical gyroscope in Matlab has been done. The mechanism of the fiber optic gyroscope phase characteristic distortion has been described. It includes a speed change of reaching the normal operating mode, which in turn may be caused by changes in the optical power when the ambient temperature is changed. The search and theoretical analysis of existing methods of stabilization phase characteristic has been carried out (using infinite impulse response filter and software control of photo detector gain). As a result of this analysis it is revealed that the available methods don't solve this problem because they don't eliminate the root cause of the fiber optic gyroscope phase characteristic distortion. A new method for signal phase stabilizing in the fiber-optical sensor has been devised. The method is based on the imposition of the normalization differences for ADC readings carrying useful speed signal. The experimental study of delays in the BIM-3 device with temperature ranging from 25 to 29 °C has been carried out. Research results showed a decrease in the maximum amount of delay fourfold and reduce the range of delay variation from 280 to 7 ms with the imposition of normalization.

Keywords: fiber optic gyroscope, phase characteristic, infinite impulse response filter, normalization.

Artem Aleynik – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Assistant, PhD, Associate professor, artemal@rambler.ru

Ivan Deineka – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior research fellow, vanodnk@gmail.com

Alexander Makarenko – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, a_makarenko@mail.ru

Mikhail Mekhrengin – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer-researcher, mehrengin@gmail.com

Vladimir Strigalev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, PhD, Associate professor, vstrglv@mail.ru

THERMAL INSTABILITY INFLUENCE OF THE RADIATION SOURCE CHARACTERISTICS ON THE SIGNAL OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE

I. Sharkov, A.Rupasov, V. Strigalev, S.Volkovskiy

The paper deals with the influence of temperature instability of the radiation source on the output of the fiber-optic gyroscope (FOG) constructed under the scheme with feedback. It is known that the heating source generally leads to a change of scale factor values. The influence of the value of the central wavelength erbium-doped broadband source on the value of the scale factor and the signal of FOG was calculated. At device rotation speed equal to 13 °/h (the Earth rotation speed), the rate determination error should be $d\Omega_{err}=7.2\cdot10^{-5}$ (°/h)·K^{-1}, but at a speed of 1 °/s the error will be $d\Omega_{err}=1.9\cdot10^{-5}$ (°/h)·K^{-1} . This result was compared with the experimental data obtained during heating source in a heat chamber at detecting the rotational speed of the Earth. In this case, the rate determination error was $d\Omega_{err}=3\cdot10^{-5}$ (°/h)·K^{-1}, i.e. significantly greater than the rate calculated earlier for the scale factor. The additional experiment with the flip of a gyroscope plane on 180° showed that the detected error is associated with zero drift, not with changes in the scale factor. It is obvious that heat radiation source error in FOG indications (due to zero drift and changes in the scale factor) does not give the possibility to achieve the necessary precision FOG equal to 0.01 °/h (1σ) with even a slight change in temperature. Data

obtained in this study necessitated the revision of the source and bringing into service a mechanism of thermal stabilization of its active elements.
Keywords: fiber-optic gyroscope (FOG), thermal drift of fiber-optic gyroscope, erbium broadband light source, zero drift of fiber-optic gyro, drift scale factor of fiber-optic gyroscope.
Ilya Sharkov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, research fellow, ilya.sharkov@gmail.com
Andrey Rupasov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, sadbender@yandex.ru
Vladimir Strigalev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, PhD, Associate professor, vstrglv@mail.ru
Sergey Volkovskiy – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, zhivotnoe1941@mail.ru

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

STATISTICAL ANALYSIS OF GEOMETRICAL PARAMETERS FOR OBJECTS WITH RADIAL SYMMETRY

K. Samusev, M. Rybin, M. Limonov

The paper deals with a comprehensive study of the statistical characteristics for an ensemble of particles with radial symmetry boundaries. Dielectric rods and spheres are among these objects which are considered as building blocks of photonic crystals and all-dielectric metamaterials. The algorithm is based on the pattern recognition procedure by means of a transformation of the original image similar to the Hough transformation. The developed algorithm gives the possibility of providing information both on the diameters of particles and on the coordinates of their centers.
Keywords: photonic crystals, metamaterials, statistical analysis, recognition procedure.
Kirill Samusev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior research scientist, PhD, k.samusev@phoi.ifmo.ru
Mikhail Rybin – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Research scientist, PhD, m.rybin@phoi.ifmo.ru
Mikhail Limonov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Leading research scientist, D.Sc., m.limonov@phoi.ifmo.ru

COMPARISON METHODS OF STEREO VISION ALGORITHMS FOR 3D FACE RECONSTRUCTION

S. Ponomarev

The results of comparative analysis of the stereo algorithms effectiveness for solving the problem of 3D model of human face reconstruction are presented. The methods of stereo vision relating to the three main classes – local, global and semi-global methods, are considered. The measure of differences between recovered depth map and the reference depth map obtained by a camera with a structured infrared illumination is proposed as the criteria for quantitative evaluation of the algorithms. During the comparison, transition to 3D space was carried out, calculation of the characteristics for the point cloud was performed, the quality of 3D surface restored with a depth map and performance of algorithms were considered. Selection of the best algorithm based on quantitative and qualitative evaluation of the algorithms was performed. The results can be used to improve the efficiency of stereo vision methods for identification of a person.
Keywords: depth map, stereo vision algorithms, 3D face reconstruction, biometric systems.
Svyatoslav Ponomarev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer, sv.v.ponomarev@gmail.com

ANALYSIS OF PROPERTIES FOR HIERARCHICAL IMAGE REPRESENTATION IN MODERN COMPUTER VISION SYSTEMS

V. Vasilev, I. Gurov, A. Potapov

Widely applied computer vision methods are considered. It is established that these methods analyze images mainly on one of levels – pixel, contour, structural, etc. Drawbacks of single-level image representations restricting invariance properties of methods based on such representations and, in particular, resulting in reduction of capability to distinguish objects of different classes while solving recognition tasks are determined. Possibility to overcome these restrictions with the help of hierarchical representations is justified. Ways of developing a synthesis theory for such optimal hierarchical image analysis systems, with minimal reduction of probability of the best higher-level hypothesis selection caused by intermediate decisions are proposed. Minimization of approximation error for posterior probability distribution for higher-level hypotheses by accounting for the only best hypotheses of lower levels is proposed to perform on the base of introducing

feedback connections between levels and adaptive selection of hypotheses of all levels with maximization of their mutual probability.
Keywords: hierarchical representations, computer vision, image analysis.
Vladimir Vasilev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Rector, D.Sc., Professor, vasilev@mail.ifmo.ru
Igor Gurov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, gurov@mail.ifmo.ru
Alexey Potapov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., professor, pas.aicv@gmail.com

METHOD FOR DYNAMIC DATA PROCESSING IN THE SPECTRAL OPTICAL COHERENT TOMOGRAPHY WITH COMPENSATION OF DISPERSION INFLUENCE

M. Volynsky, I. Gurov

During signals formation in spectral optical coherent tomography, spectral interference fringes suffer the frequency modulation because of the frequency dependence on the wavelength due to a medium dispersion influence, which leads to the spectrum broadening of the detected signal and decrease of spectral interferometer resolution. The paper deals with a method of dynamic data processing in spectral interference based on the discrete linear Kalman filtering algorithm with dispersion influence compensation in media for depth resolution in investigating of optical-inhomogeneous partially-transparent objects. The algorithm is an identification of parameters (amplitude and initial phase) of harmonic components of interference signal with a fixed set of frequencies by linear discrete Kalman filter. Information application about the initial phase gives the possibility of dispersion influence compensation and avoiding unwanted artifacts, which improves resolution of spectral optical coherent tomography. Processing results of 1D and 2D optical coherent tomography signals on an investigation example of randomly inhomogeneous scattering media in biomedicine are presented.
Keywords: spectral interferometry, optical coherent tomography, compensation of dispersion in media, Fourier transform, Kalman filter.
Maxim Volynsky – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, maxim.volynsky@gmail.com
Igor Gurov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, gurov@mail.ifmo.ru

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

INTERVAL ESTIMATION SYSTEM DESIGN FOR TESTOSTERONE HORMONE DYNAMICS MODEL

D. Efimov, A. Kremlev, T. Kharkovskay, S. Chebotarev

The paper deals with the interval observer design for nonlinear parameter-varying systems under assumption that the vector of scheduling parameters is not available for measurements. It is shown that the observer makes it possible to derive the area of system states estimates, which is guaranteed to contain the state value at a given time. The efficiency of the proposed approach is demonstrated by computer simulation of testosterone hormone dynamics system.
Keywords: observer, interval estimation, uncertainty, parametric-varying systems, nonlinear systems, cooperativity.
Denis Efimov – France, Villeneuve d'Aseq, French Institute for Research in Computer Science and Control (Institut national de recherche en informatique et en automatique, INRIA), Senior researcher, D.Sc., Denis.Efimov@inria.fr
Artem Kremlev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, kremlev_artem@mail.ru
Tatiana Kharkovskaia – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, easymedia@mail.ru
Stanislav Chebotarev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, freest5@gmail.com

METHOD OF INTERFEROMETER SIGNAL PHASE MEASUREMENT

G. Miroshnichenko, I. Deyneka, D. Pogorelaya, F. Shuklin, M. Smolovik

Method of interferometer signal phase measurement for signal processing of fiber-optical phase sensors is proposed. The method permits to compensate an interferometer signal frequency temperature drift by generation a three-stroke form of modulating sawtooth waveform. The linear least-squares method having a single solution is suggested. Results of numerical experiment are given, confirming the accuracy of the designed phase

measuring method, and numerical estimates of temperature phase drift are given, set by modulator, and a level of temperature stability, which provide phase measurement order of magnitude equal to 10^{-8} rad.
Keywords: interferometer signal phase, sawtooth modulation, temperature drift of frequency.
George Miroshnichenko – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, gpmirosh@gmail.com
Ivan Deineka – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior research fellow, vanodnk@gmail.com
Daria Pogorelaya – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, pdaria@mail.ru
Philipp Shuklin – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer-researcher, shuklin.philipp@gmail.com
Mikhail Smolovik – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer-researcher, ma.smolovik@gmail.com

CALCULATION METHOD OF THE TRANSIENT TEMPERATURES FOR MOVING SPACE OBJECT ON THE ELLIPTICAL ORBIT

Yu. Bayova, Ye. Lapovok, S. Khankov

Despite the large number of publications on this subject, there are no currently analytical methods of calculation that can evaluate the temperature changes of the space object, moving on the extended elliptical orbit. Calculation method of the transient temperatures of the isothermal spherical shell space object, moving on the elliptical orbit, is suggested. It includes the calculation of time dependence of the space object altitude above the Earth based on the solution of the equation of motion on the elliptical orbit. Irradiance coefficients are calculated at each time point and are used for calculation of heat fluxes from the Earth and solar radiation reflected by the Earth and falling on the object. Then calculation of the transient heat balance is done including heat flux from the sun and average surface temperatures. Calculation results of the transient thermal condition of the space object for specific characteristics of orbit and specific heat, depending on thickness of the wall, is presented as an example. The proposed mathematical model is easy and convenient for calculations. The proposed algorithm can be extended to the other convex design configuration.
Keywords: space object, elliptical orbit, heat flux, transient temperature, transient heat balance.
Yulia Bayova – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, yul.bayo@yandex.ru
Yevgeniy Lapovok – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, scientific researcher, PhD, Leva0007@rambler.ru
Sergey Khankov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, leading scientific researcher, D.Sc., Leva0007@rambler.ru

MECHANICS AND MECHATRONICS

ERRORS MODELING OF GRAVITY METER GYROSTABILIZER WITH THE FIBER-OPTIC GYROSCOPES

A. Dzyuba, L. Staroseltsev

The paper deals with a mathematical model of an indicator two-axis gyro of a gravity meter sensor in the gimbals. Fiber - optic gyroscopes are used as a gyro sensor. The scheme of gyro modeling errors is given. The key advantages of fiber- optic gyroscopes, as compared with gyroscopes with a mechanical carrier of angular momentum, are highlighted. Mathematical model of the gyro is received as a combination of direct drive servo system and the scheme of indirect accelerometer correction. Correction scheme is a short-period gyro-vertical, damped by high-speed measurements using consumer equipment satellite navigation system. Time constant value of the vertical is determined by curve fitting method of local spectral density error for fiber- optic generator against a background of accelerometer errors and consumer equipment satellite navigation system. The contribution of the sensor errors of stabilization system to the overall uncertainty is defined, and the requirements for them are formulated.
Keywords: gyrostabilizer, fiber-optic gyroscope, local approximation method.
Andrei Dzyuba – Russia, Saint Petersburg, CSRI “Elektropribor”, engineer; Saint Petersburg State Electrotechnical University (“LETI”), student, an_nik_dzyuba@mail.ru
Leonid Staroseltsev – Russia, Saint Petersburg, CSRI “Elektropribor”, leading scientific researcher; Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Laboratory head, PhD, staroseltsev@mail.ru

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

TYPIFICATION TOOLS AND PRAGMATICS OF ORG-MASTER MODELING LANGUAGE

D. Kudryavtsev, D. Koznov, L. Grigoryev

Enterprise Architecture Management (EAM) is a growing area nowadays, which supports enterprise transformations and provides holistic approach to business management. ORG-Master is a Russian EAM tool with 15 years history, which is successfully applied in industry. The current paper deals with new capabilities of ORG-Master modeling language applied in the last software version: more strict typification and specified pragmatics.

Keywords: enterprise architecture, enterprise architecture modeling, ontology engineering, ontologies, business processes, BPMN, UML, domain-specific modeling, visual modeling, model-driven development, DSM-approach.

Dmitry Kudryavtsev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State Polytechnic University, Associate professor, “Business Engineering Group”, LLC, Senior consultant, PhD, Associate professor, dmitry.ku@gmail.com

Dmitry Koznov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University, Associate professor, PhD, Associate professor, dkoznov@yandex.ru

Lev Grigoryev – Russia, Saint Petersburg, “Business Engineering Group”, LLC, Director, griglev@gmail.com

A NEW APPROACH FOR TEMPERATURE MEASUREMENTS OF FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS LOCAL AREA BASED ON THE MONTE-CARLO METHOD

P. Kustarev, S. Bykovsky

The paper deals with the digital circuits for temperature control of VLSI-chips. The basic approach is temperature measurement on the basis of a typical logic gate delay. Various alternatives of gate delay measurement are applied. Advantages and limitation of sensors on the base of ring oscillators are presented: high accuracy and speed of measurement, but small localization and the bad repeatability of parameters at Field Programmable Gate Array implementation, high working frequencies, power consumption and level of an electromagnetic emission. It is offered to use the alternative circuit of the measuring unit implementing the statistical Monte-Carlo method. The circuit main principle is selection of delay areas of repetitive pulses fronts at their propagation through a logical gate and counting a share of casual testing pulses hits in these areas relative to all time of measurement. The propagation delay of a logical gate is converted in temperature value in such a way. Research results of the offered circuit have confirmed the efficiency of gate propagation delays measurement circuits by the method of Monte-Carlo for determination of a chip temperature, including local overheating near power-intensive functional blocks: processors, memory blocks and others. The offered circuit has shown the accuracy of temperature measurements not worse than the circuit based on ring oscillator - at 1,5K level, but has smaller complexity and approximately 25 % less square occupied by a chip. Important singularity is the possibility of transfer and cloning of the measuring block in various points of a chip without requalification necessity that provides simplicity of its application in Field Programmable Gate Array based systems.

Keywords: Time to Digital Converter, TDC, VLSI, FPGA, SoC, Field Programmable Gate Array, temperature sensor, ring oscillator.

Pavel Kustarev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, kustarev@yandex.ru

Sergey Bykovsky – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate; “LMT”, Ltd, engineer, bsv.serg@gmail.com

DESIGN PRINCIPLES OF A COMBINED NETWORK TOPOLOGY FOR ADVANCED ON-BOARD COMPUTING SYSTEM

E. Kniga, I. Zharinov

The paper deals with principles of network organization for on-board digital computing system. The most common network topology today in practice, “duplex star” and “common bus”, do not meet the basic requirements of a network organization, presented for computing systems for advanced aircraft in accordance with the concept of integrated modular avionics. A new technical decision for building a fault-tolerant computing system based on the use of mixed topology, which combines elements of two well-known topologies – “fully connected net” and “duplex star”, is offered in the paper. This solution can improve the performance quality of computing system. The paper focuses on the reliability of a computing on-board system, built on the principle of mixed topology with different methods of tasks assignment to available computing resources. The result of the practical implementation of the proposed topology of the on-board digital computing system is its structure, introduced in a real practical development of the aviation industry.

Keywords: network technologies, integrated modular avionics, computing systems.

Ekaterina Kniga – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, ekovinskaya@gmail.com
Igor Zharinov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg Scientific Design Bureau "Electroavtomatica" n.a. P. A. Efimov, Head of learning scientific center, D.Sc., Associate professor, igor_rabota@pisem.net

PRINCIPLES OF FUNCTIONAL ORGANIZATION FOR GROUP OF FIELD GEOPHYSICAL DEVICES OF THE NEW GENERATION

V. Denisov, A. Radilov

The urgency of the development for the group of field geophysical devices of new generation is justified. Generic functional requirements for these devices from the industry are summarized. A unified platform for their creation is described. The advantages of its application are shown. The development experience of the field radiometer as the first field instrument created on the principles of a single instrument platform is described.
Keywords: geophysical instruments, instrument platform, field radiometer.
Victor Denisov – Russia, Saint Petersburg, JSC "Special Design Bureau of Underground Navigation Devices", Deputy general director, D.Sc., 070255@gmail.com
Andrei Radilov – Russia, Saint Petersburg, Russian Academy of Sciences Saint Petersburg Branch of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), leading programmer, andrad@mail.ru

AGENTS INTERACTION IN INFORMATION SYSTEM FOR THE ENTERPRISE WITH THE ADAPTATION OF MECHANISMS AND USER INTERFACE

A. Vladimirov

The paper deals with a problem of large information systems functioning that can process large volume of heterogeneous information at the enterprise. The structure of adaptive information system with the dedicated major segments: administrative and service-agent segment, data operating segment, intellectual segment is developed. The features of the system components are shown. The agent component structure of the adaptive information system is developed. The main components of the agent interaction model are marked out: coordination agent, adaptation agent, knowledge base agent, database agent, user agent for development of agents interaction process model in multi-agent adaptive information system by colored Petri nets. Main agent states, used in tasks processing are described. Model operation at different stages, analysis of the main system properties is studied. Analysis gives the possibility to reveal the most congested parts. Users' statistics of the system tools usage at the enterprise for getting probabilities is collected. The processes of system mechanisms adaptation and interface are developed and studied on the basis of the obtained statistical data. Application of the algorithm elements makes it possible to reduce time spending by the employees at the enterprise for finding necessary elements and tools, to simplify the process of users' interaction with the system, to modify the system work at high loads with copying the actuating agents.
Keywords: multi-agent adaptive systems, agents interactions modeling, colored Petri nets, agent-based architecture.
Alexander Vladimirov – Russia, Vologda, Vologda State Technical University, postgraduate, iclever7@yandex.ru

MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

EFFECT OF METALLIC ISLET FILMS ON AGGREGATION AND MOLECULAR ABSORPTION ENHANCEMENT OF PSEUDOISOCYANINE

N. Toropov, T. Vartanyan

The paper deals with experimental research results of silver islet films effect on the aggregation and optical properties of pseudoisocyanine dye molecular layers. Samples were prepared by metal evaporation on the dielectric substrate in a high-vacuum chamber and were coated with molecular layers by means of spin-coating technique. Morphology of islet films was investigated by scanning electron microscope. Absorption spectra of the samples were recorded on a spectrophotometer. Analysis of the component composition of molecular layers with Ag nanoparticles has shown the presence of the absorption band, which was not observed in the absorption spectra of the thin film and an alcohol solution of pseudoisocyanine. A new band identification was carried out by the absorption spectra of pseudoisocyanine aqueous solution and the spectra of thin film made of the aqueous-alcoholic solution with addition of NaCl. It was established that the resulting absorption band corresponds to the *J*-aggregates. Thus, in the presence of silver nanoparticles the degree of pseudoisocyanine molecules aggregation is increased. The maximum of optical density of the molecular layer increases by 20 times.
Keywords: metallic islet film, localized surface plasmon resonance, molecular layer, silver, pseudoisocyanine, *J*-aggregate.
Nikita Toropov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer, nikita.a.toropov@gmail.com

Tigran Vartanyan – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Laboratory head, D.Sc., Senior scientific researcher, tigran@vartanyan.com

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF LUMINESCENT NANOCOMPOSITES FOR INTEGRATED OPTICAL MICROCHIPS

I. Denisiuk, J. Burunkova, N. Sobeshchuk

The paper deals with the first experiment results on research of a synthesis method for nanoparticles doped by erbium. Using a low-temperature synthesis (180 ° C) in the anhydrous solvent instead of the standard synthesis method in the aqueous medium with the following high temperature processing (700 ° C) gives the possibility to avoid nanoparticles coagulation and keep their initial nano size and, therefore, to obtain transparent nanocomposite material suitable for photonics applications. Comparison of experimental data (absorption and luminescence spectra) with the literary one, confirms the receipt of the erbium oxide nanocrystals.

Keywords: nanocomposite, nanocrystal, erbium, luminescence, telecommunication, erbium amplifier.

Igor Denisiuk – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, denisiuk@mail.ifmo.ru

Julia Burunkova – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, burunj@list.ru

Nina Sobeshchuk – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, daedraazura@gmail.com

PRECISE MANIPULATION OF MICRO- AND NANOPARTICLES UNDER THE ELECTRON BEAM

A. Denisyuk, F. Komissarenko

The paper deals with a new method of particle manipulation based on electrostatic interaction between objects charging under the beam of a scanning electron microscope. The method gives the possibility for well-controlled picking up, transportation and dropping off micro- and nanoparticles and also for visualization of the process and manipulation result in real time on electron images. Precise manipulation of Al_2O_3, WO_3 and tungsten particles with sizes ranging from 50 nm to 1 micron by a metallic tip charged under the electron beam is experimentally demonstrated. A theoretical model is created, based on the assumption that the dielectrophoretic force by the charged metallic tip pulls the particles whereas the Van-der-Waals force retains them on a substrate or on other particles. The given method can be used in micro- and nanoparticle assembly, fabrication of specialized probes for scanning probe microscopes and estimation of particle-substrate and particle-particle interaction forces.

Keywords: electron microscopy, micro- and nanoparticle manipulation, dielectrophoresis.

Andrey Denisyuk – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, aidenisyuk@gmail.com

Filipp Komissarenko – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, 1576406@gmail.com

OPTICAL PROPERTIES OF PbSe QUANTUM DOTS FORMED IN FLUORINE PHOSPHATE GLASS

E. Kolobkova, A. Polyakova, A. Abdrshin, A. Trofimov, N. Nikonorov, V. Aseev

The paper deals with characteristics of PbSe quantum dots formation, deposited in fluorine phosphate glasses of the Na_2O - P_2O_5 - Ga_2O_3 - $A1F_3$ - ZnO based on data analysis of differential scanning calorimetry, X-ray diffraction and spectral-luminescent properties. The sizes of synthesized quantum dots are calculated (4-9 nm). Iintense luminescence was observed in the region from 500 to 1500 nm for all sizes of quantum dots. It is suggested that the luminescence band (575 nm) appearing at short heat treatment times is associated with the luminescence of PbSen and Sen clusters, where n = 2,3,4. Further increase of heat treatment time results in a shift of luminescence band maximum up to 1500 nm.

Keywords: quantum dots, fluorine phosphate glass, PbSe, molecular clusters.

Elena Kolobkova – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Associate professor, Kolobok106@rambler.ru

Alexandra Polyakova – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, avpoliakova@bk.ru

Albert Abdrshin – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, avpoliakova@bk.ru

Alexander Trofimov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, Exeptional777@mail.ru

Nikolai Nikonorov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, Nikonorov@oi.ifmo.ru

Vladimir Aseev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, PhD, Aseev@oi.ifmo.ru

SELF-ORGANIZATION OF LEAD SULFIDE QUANTUM DOTS OF DIFFERENT SIZES

E. Ushakova, V. Golubkov, A. Litvin, P. Parfenov, A. Baranov

The paper deals with self-organization process of semiconductor lead sulfide nanoparticles with a luminescence in the range of 0.8–2 mkm. Corresponding diameters of nanoparticles determined by X-ray analysis lie in the range of 2.5–8 nm. Nanostructures are fabricated by evaporation of solvent on a glass substrate and by embedding in a porous matrix. The process of self-organization on the substrate and in the matrix is studied by means of X-ray structural analysis. It is shown that self-organized nanostructures are ordered structures consisted of close-packed nanoparticles. A formation of spatial regulation of nanoparticles leads to the appearance of specific maxima in the angular dependence of X-rays scattering, which position is determined by the period of the structure. It is found that the type of this regulation is independent of the size of nanoparticles, type of substrate and matrix. It is shown that a distance between nanoparticles centers in obtained structures depends linearly on its diameter, and the average value of the slope coefficient of size dependence is (1,2±0,1).

Keywords: quantum dot, nanoparticle, superlattice, X-ray structural analysis, lead sulfide.

Elena Ushakova – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics junior research scientist, PhD, el.ushakova@gmail.com

Valery Golubkov – Russia, Saint Petersburg, Grebenschikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Laboratory head, D.Sc., senior scientific researcher, golubkov@isc1.nw.ru

Alexander Litvin – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer, litvin88@gmail.com

Peter Parfenov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, qrspeter@pochta.ru

Alexander Baranov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, a_v_baranov@yahoo.com

COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

LOCAL MINIMIZATION OF THE BURED VIAS NUMBER IN THE PRINTED CIRCUIT TOPOLOGY

S. Luzin, S. Popov, Yu. Popov

The paper deals with an algorithm for local minimization of the bured vias number on a multilayer printed circuit board. The approach is based on the topology analysis in the vicinity of an adjacent vias pair. It considers the possibility of rerouting of wires, which impede the transfer of a specific wire on a specific layer. Cases with not adjacent vias (there is a planar contact or a branch point without a via on the path from one via to another) are reduced to the case where the vias are adjacent. Some shortcomings of consistent wire routing are analyzed. The shortcomings of methods of minimizing of the vias number based on the wire fragments transfer to another layer if the transfer is carried out without conflicts are considered too. The algorithm is implemented and applied in the Russian system of computer-aided design TopoR. Comparison results of several printed circuit boards routing are presented using the algorithm and not using it. The proposed algorithm additionally reduces the number of vias by 3 – 11% in test examples of multilayer printed circuit boards.

Keywords: CAD, autorouting, TopoR, vias number minimization.

Sergey Luzin – Russia, Saint Petersburg, “EREMEX” Ltd, technical director, D.Sc., luzin@eremex.com

Sergey Popov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate; “EREMEX” Ltd, software developer, sergey.popove@yandex.ru

Yury Popov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate; “EREMEX” Ltd, software developer yurpopov@rambler.ru

FORMATION AND DISPLAY PRINCIPLES FOR AN ARRAY OF GEOINFORMATION DATA BY MEANS OF ONBOARD DISPLAY SCREEN

P. Paramonov, M. Kostishin, I. Zharinov, V. Nechaev, S. Sudarchikov

The paper deals with the problem of a workstation creation for preparation, storage and loading of geoinformation data and flight plan to the onboard system of cartographic information. The principles of geoinformation data formation are analyzed, a unified format is suggested for data and instructions storing, which together constitute the array of cartographic information. The description of the software component, part of the workplace, is given. A new structure of the onboard system of cartographic information is created, notable for integrated into a single embodiment design. Suggested technical solutions have been tested in practice.

Keywords: geoinformation resource, digital data array, display.

Pavel Paramonov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, postmaster@elavt.spb.ru

Maxim Kostishin – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, job.max@me.com

Igor Zharinov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg Scientific Design Bureau "Electroavtomatica" n.a. P. A. Efimov, Head of learning scientific center, D.Sc., Associate professor, igor_rabota@pisem.net
Vladimir Nechaev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg Scientific Design Bureau "Electroavtomatica" n.a. P. A. Efimov, Head of scientific research center, nil-12@mail.ru
Sergey Sudarchikov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, s-a-sudarchikov@yandex.ru

INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION

SURFACE ROUGHNESS IMPACT ON THE CORROSION RESISTANCE OF THE PRODUCTS IN MECHANICAL ENGINEERING

A. Ivanov, D. Leonov

The necessity to improve the quality of products by optimizing micro geometry of their surfaces is proved. A solution to the problem of technological support for corrosion resistance of engineering products based on the use of non-parametric method of surface micro-geometry evaluation and monitoring is suggested. The parameters of processing technology are given, making it possible to provide the best possible surface roughness of the D16T alloy parts with minimum value of corrosion penetration depth into their surface.
Keywords: surface roughness, non-parametric method, corrosion resistance, corrosion penetration depth.
Andrey Ivanov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, ivaanur72@mail.ru
Dimilyan Leonov – Bulgaria, Sopot, VMZ Co. Sopot, Bulgaria, Deputy Assembly Director, dimilqn@mail.ru

INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

USERS DISTINCTION BASED ON THEIR BEHAVIOR IN THE INTERNET

D. Yurasov, I. Zikratov

The paper deals with users' identification and authentication in the web-space. A method for distinguishing of two or more users accessing the Internet by one common computer and browser based on the analysis of their surfing history is proposed. The method is based on sites identification, which the user visits frequently and regularly, and their hierarchical clustering. Analysis of surfing history for more than 260 000 users, collected by cookies, which are stored on their computers, was conducted for method verification. High percentage of correct users' identification was achieved.
Keywords: information security, hierarchical clustering, cookies, multiuser computer, users' identification, authentication.
Dmitry Yurasov - Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, yurasov17@gmail.com
Igor Zikratov - Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, igzikratov@yandex.ru

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

NATIONAL INNOVATIVE SYSTEM: STRUCTURE AND ROLE OF FINANCIAL COMPONENT

T. Krasnoperova

The paper deals with theoretical problems of national innovative system formation and the author's definition, which noted the evolutionary character of its development as a subsystem of the economic system, realization of economic interests as an activity goal and financing as an indispensable condition for innovation. The main principles of the national innovation system are defined and proved: integrity, focus, optimality, hierarchy, coordination of actions between all elements of the system and evolutionary development. The structure and hierarchy of function levels is shown, core and supporting; functions of the financial component and its role in ensuring of innovation development are defined. The structure of national innovation system of Russia is presented with consideration of its development peculiarities. According to the author, it is divided into the Federal and regional (along a vertical); into the subsystems according the types of activity depending on the nature of financing source (along a horizontal), as well as organizations within NIS, realizing the creation, commercialization and financing of innovations, personnel training.
Keywords: national innovative system, banking sector, system principles, innovative development, financial security.
Tanzilya Krasnoperova – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, krasntat@mail.ru

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

IMPROVEMENT OF TRAINING PROGRAMS FOR HUMAN RESOURCE MANAGERS ON THE BASIS OF LEARNING STYLES ANALYSIS

E. Karpova

The paper deals with optimization problem of the learning process for adults. A theoretical analysis of the key individual psychological characteristics that influence the perception of broadcast knowledge into the learning process is done. The models of E. K Lindemann, D. Kolb, C. Rogers making it possible to create new conditions for better assimilation of knowledge are considered. It is shown that education of adult students significantly differs from the training of young specialists. It is noted that when planning training programs it is appropriate to take into account the different learning styles of listeners. The dominant learning style of a listener determines the characteristics of the learning process and the human response to specific techniques and efforts of the teacher. The results of a comprehensive study are given, the aim of which was to determine the best organizational and pedagogical conditions for training of the personnel managers. The total sample was consisted of 135 people. The duration of the training program is 540 hours. Results were analyzed and conclusions were done about the feasibility of interactive teaching methods application. Correlation analysis showed that the use of these training methods forms a positive relationship with the development of such indicators of management capacity as an in-depth understanding of managerial work, the ability to train and solve situational problems in the management of personnel.

Keywords: adult education, professional training, learning style.

Elena Karpova – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, dr.karpova@mail.ru

BRIEF REPORTS

AUTOMATED HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM FOR CONTROL OF EXTENDED RADIATION SOURCES

E. Gorbunova, V. Korotaev, V. Peretyagin

The paper deals with creation results of automated hardware-software system for monitoring and certification of parameters and characteristics of multi-element radiation sources based on emitting diodes. The presented system is designed for simultaneous determination of the spectral characteristics and color parameters of radiation sources in three-dimensional space, and the uniformity of illumination or irradiation area analysis in the wavelength range from 200 nm to 1100 nm.

Keywords: radiation source, light-emitting diode (LED), multi-element radiation source, control of parameters.

Elena Gorbunova – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, scientific researcher, PhD, gorbunova@grv.ifmo.ru

Valery Korotaev – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, korotaev@grv.ifmo.ru

Vladimir Peretyagin – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, research engineer, peretyagin@mail.ru

IMPROVEMENT OF DYNAMIC TEXTURE COMPRESSION

I. Perminov

The paper deals with texture usage model based on texture views and limitations of the current graphics APIs (Direct3D 11.2 and OpenGL 4.4) in case of dynamic texture compression application. The proposed approach aims on improving of dynamic texture compression by eliminating the copying step between compressed and uncompressed buffers. That copying step is enforced by existing APIs. The results of testing performance of dynamic texture compression are also given.

Keywords: texture compression, Direct3D, OpenGL.

Ilya Perminov – Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, i.am.perminov@gmail.com