

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	1
Оптическая система переменного увеличения в осветительном устройстве микроскопа	Точилина Т.В. 1
Расчет канального оптического волновода с произвольным распределением показателя преломления с применением эрмитового набора В-сплайнов	Дейнека Г.Б., Серебрякова В.С. 6
ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА	11
Генерация третьей гармоники при отражении от кристалла фемтосекундного излучения высокой мощности	Мохнатова О.А., Путилин С.Э., Беспалов В.Г., Козлов С.А. 11
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ В АВИАНИКЕ	15
Разработка системы автоматизированного контроля бортового оборудования летательных аппаратов	Есин Ю.Ф., Парамонов П.П., Сабо Ю.И. 15
Моделирование погрешностей измерений бортовых навигационных устройств	Козис Д.В., Жаринов О.О., Сулов В.Д. 18
Принципы построения крейта бортовой многопроцессорной вычислительной системы для авионики пятого поколения	Жаринов О.О., Видин Б.В., Шек-Иовсепяц Р.А. 21
АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	28
Восстановление смазанных под углом и зашумленных изображений без учета граничных условий	Дайнеко М.В., Сизиков В.С. 28
Параметрическая идентификация вентильного электропривода азимутальной оси телескопа траекторных измерений	Ильина А.Г. 33
Динамическое наблюдение нелинейных двоичных динамических систем	Ушаков А.В., Яицкая Е.С. 38
МЕХАНИКА И МЕХАТРОНИКА	44
Определение установившихся режимов работы виброзащитной системы с двумя степенями свободы	Иванов С.Е. 44
Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах	Евстифеев М.И., Розенцвейн Д.В. 46
ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА	51
Расчет теплового режима электронных компонентов на печатной плате	Бирюлин Г.В., Егоров В.И., Муров С.Ю. 51
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	56
Исследование галлатов лантана методом рентгенфазового анализа	Пищенко О.А., Пьянкова Л.А. 56
Применение ионной литографии для формирования наноразмерных каналов микрофлюидных чипов в стеклянных подложках	Евстрапов А.А., Мухин И.С., Кухтевич И.В., Букатин А.С. 59
Зонд для сканирующей микроскопии токов ионной проводимости	Голубок А.О., Левичев В.В., Матвеев В.Н., Ствяляга А.В. 64
Микро- и наномодификация металлического слоя на полимерной подложке в режиме динамической силовой литографии	Пинаев А.Л., Голубок А.О. 67
КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	73
Матричное представление семейства графов смежности над набором фрагментов знаний	Опарин В.В., Фильченков А.А., Сироткин А.В., Тулупьев А.Л. 73
Пакет полуформализованных моделей системы имитационного моделирования	Мальшева Е.Н., Гольдштейн С.Л. 77
Кодовые шкалы на основе нелинейных последовательностей для преобразователей угловых перемещений	Ожиганов А.А., Прибыткин П.А. 81
Специализированная СБИС преобразования видеоданных	Умбиталиев А.А., Шипилов Н.Н., Ибатуллин С.М., Фахми Ш.С. 84
Автоматическое сводное реферирование новостных сообщений	Тарасов С.Д. 88
БИОМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ	94
Математическое моделирование влияния установки кофемашины на гемодинамику кровеносной системы	Иванов Ю.А., Добросердова Т.К. 94
Вычислительные аспекты имитационного моделирования распространения туберкулеза	Леоненко В.Н., Логинов К.К. 99
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ	104
Концептуальная модель для извлечения результатов обучения из избыточного содержания образования	Васильев В.Н., Лисицына Л.С., Шехонин А.А. 104
ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ И ТЕХНИКИ.....	109
Зарождение оптического производства в дореволюционной России	Каменская Н.Е. 109
К вопросу о подготовке квалифицированных кадров для русской промышленности на рубеже XIX–XX вв.	Кузьмина О.В. 113
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	117
Методы расчета и выбора основных параметров низкоуровневых спектрально-оптических систем видимого и коротковолнового ИК диапазонов	Яроцкая Е.А. 117
Расчет линейных смещений и угла поворота изображения при движении оптико-электронной системы относительно наблюдаемой сцены	Поляков А.Ю., Тресков В.В., Демидов В.М. 118
Оптико-электронные системы контроля промышленных сооружений по положению их элементов	Михеев С.В., Араканцев К.Г., Копылова Т.В. 119
Получение мультиплексных голограмм на фото-термо-рефрактивном стекле	Златов А.С., Корзинин Ю.Л., Никоноров Н.В. 120
Влияние термообработки на изменение показателя преломления объемных фазовых голограмм, записанных на фото-термо-рефрактивном стекле	Златов А.С., Иванов С.А., Приказов М.Ю., Корзинин Ю.Л., Никоноров Н.В. 121
Импликация и эквивалентность как основа верификации	Немолочнов О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И. 122
Оценка соревновательной готовности спортсмена на базе метода газоразрядной визуализации	Величко Е.Н. 123
SUMMARY	124



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР.....

д.т.н., профессор В.О. Никифоров

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.т.н., профессор А.А. Бобцов, д.т.н. А.В. Бухановский,
д.т.н., профессор В.А. Валетов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Варганян,
д.т.н. М.А. Ган, д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин,
к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова, д.т.н., профессор А.В. Демин,
к.т.н., доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора),
д.ф.-м.н., профессор Ю.Л. Колесников, д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов,
д.т.н., профессор А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор В.В. Курейчик,
д.т.н., доцент Л.С. Лисицына, к.т.н., доцент В.Г. Мельников,
д.т.н., профессор Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор Н.В. Никоноров,
д.т.н., профессор А.А. Ожиганов, д.т.н., профессор П.П. Парамонов,
д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.Ю. Перлин, д.т.н., профессор И.Г. Сидоркина,
д.т.н. О.А. Степанов, д.т.н., профессор В.Л. Ткалич,
д.т.н., профессор А.А. Шалыто, д.т.н., профессор Ю.Г. Якушенков

Секретарь Г.О. Артемова

Редактор Н.Ф. Гусарова

Перевод Н.Г. Лещикова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО, комн. 330

Телефон / факс (812) 233 45 51

<http://books.ifmo.ru/ntv/>

E-mail: karmanov@mail.ifmo.ru



ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо кратко (объемом до 100 слов) 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.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

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. В аннотации не допускаются ссылки на цитированную литературу и громоздкие формулы.

Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, отделяется от предыдущего раздела полужирной 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://books.ifmo.ru/ntv/>

Подписано к печати 15.06.2010 Тираж 350 экз. Заказ № 16(68)

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-33466 от 10.10.2008 г.
Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать
(Газеты. Журналы)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES.....	1
Optical system of variable magnification in the microscope lighting appliance	<i>T. Tochilina</i> 1
Computation of optical channel waveguide with arbitrary refractive index allocation using B-spline method	<i>G. Deineka, V. Serebryakova</i> 6
PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS.....	11
Third harmonic generation at reflection from crystal of high-intensity femtosecond radiation	<i>O. Mokhnatova, S. Putilin</i> 11
	<i>V. Bespalov, S. Kozlov</i>
DESIGN AND SIMULATION IN AVIONICS.....	15
Automated control system development of the aircraft avionics	<i>Yu. Esin, P. Paramonov, Yu. Sabo</i> 15
Measurement errors modeling of onboard navigation devices	<i>D. Kozis, O. Zharinov, V. Suslov</i> 18
Crate creation strategy of the onboard multiprocessing computing system for the fifth generation avionics	<i>O. Zharinov, B. Vidin,</i> 21
	<i>R. Shek-Iovsepjantz</i>
ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS.....	28
Restoration of noisy images blurred angularly without boundary conditions	<i>M. Daineko, V. Sizikov</i> 28
The parametric identification of the telescope azimuth axis BLDC electric drive	<i>A. Il'ina</i> 33
Dynamic observation of non-linear binary dynamic system	<i>A. Ushakov, E. Yaitskaya</i> 38
MECHANICS AND MECHATRONICS.....	44
Definition of the steady state vibration isolation systems with two degrees of freedom	<i>S. Ivanov</i> 44
Contact interaction analysis in the micromechanical gyroscopes	<i>M. Evstifeev, D. Rozentsveyen</i> 46
THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING.....	51
Thermal analysis of electronic components on printed circuit board	<i>G. Biryulin, V. Egorov, S. Murov</i> 51
MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES.....	56
Investigation of lanthanum gallates by x-ray diffraction analysis	<i>O. Pshenko, L. Pyankova</i> 56
Ion lithography application for nanoscale channel formation in glass microfluid chips	<i>A. Evstrapov, I. Mukhin,</i> 59
	<i>I. Kukhtevich, A. Bukatin</i>
Probe for scanning ion-conductance microscopy	<i>A. Golubok, V. Levichev,</i> 64
	<i>V. Matyzhonok, A. Stovpyaga</i>
Micro- and nanomodification of a metal layer on a polymeric substrate in dynamic and static force lithography mode	<i>A. Pinaev, A. Golubok</i> 67
COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES.....	73
Matroidal representation for the adjacency graphs family built on a set of knowledge patterns	<i>V. Oparin, A. Filchenkov,</i> 73
	<i>A. Sirotkin, A. Tulup'yev</i>
Package of semiformalized models of imitating modeling system	<i>E. Malysheva, S. Goldshtein</i> 77
Code scales on the basis of nonlinear sequences for converters of angular movements	<i>A. Ozhiganov, P. Pribytkin</i> 81
Special VLSI for video data conversion	<i>A. Umbitaliev, N. Shipilov,</i> 84
	<i>S. Ibatullin, Sh. Fahmi</i>
Automatic summary news abstracting	<i>S. Tarasov</i> 88
BIOMEDICAL TECHNOLOGIES.....	94
Numerical modeling of vena cava filter placement and its effect on haemodynamics	<i>Yu. Ivanov, T. Dobroserdova</i> 94
Computational aspects of tuberculosis spread simulation	<i>V. Leonenko, K. Loginov</i> 99
NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION.....	104
Conceptual model for the extraction of learning outcomes from the excessive education content	<i>V. Vasilev, L. Lisitsyna, A. Shehonin</i> 104
FROM THE HISTORY OF SCIENCE AND TECHNIQUE.....	109
The origin of optical production in pre-revolutionary Russia	<i>N. Kamenskaya</i> 109
About skilled personnel training for the Russian industry at the turn of XIX-XX centuries	<i>O. Kuzmina</i> 113
BRIEF REPORTS.....	117
Selection and analysis methods for key parameters of low-level multispectral systems for visible and short-wave infrared ranges	<i>E. Yarotskaya</i> 117
Image linear shifts and rotation angle estimation for electronic optical system movement relatively to observable scene	<i>A. Polyakov, V. Treskov, V. Demidov</i> 118
Optical-electronic systems for industrial buildings monitoring according to their elements position	<i>S. Mikheev, K. Arakantsev, T. Kopylova</i> 119
Multiplex holograms on photo-thermo-refractive glass	<i>A. Zlatov, Yu. Korzinin, N. Nikonorov</i> 120
Thermal treatment influence on refractive index of phase volume holograms based on silicate photo-thermo-refractive glass	<i>A. Zlatov, S. Ivanov, M. Prikazov</i> 121
Implication and equivalence as a basis for verification	<i>Yu. Korzinin, N. Nikonorov</i> 122
Evaluation of sportsman competition preparedness based on gas discharge visualization method	<i>O. Nemolochnov, A. Zykov, V. Polyakov</i> 122
	<i>E. Velichko</i> 123
SUMMARY.....	124

УДК 535.317.1

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ
В ОСВЕТИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ МИКРОСКОПА

Т.В. Точилина

Выполнен анализ эффективности использования светового потока в оптической системе осветительного устройства современного микроскопа. Показано, что параметры наблюдательной и осветительной ветвей микроскопа можно согласовать путем включения в оптическую систему осветительного устройства системы переменного увеличения, что позволит более чем в 10 раз повысить эффективность использования светового потока. Для этого необходим новый подход к построению оптической системы осветительного устройства. Рассмотрены варианты построения таких систем, получены аналитические соотношения, определяющие габариты входящих в них элементов.

Ключевые слова: осветительное устройство, конденсор, коллектор, объектив, световой поток, окуляр.

Введение

Избыточный световой поток, формируемый осветительным устройством современного микроскопа, не только приводит к нагреванию устройства, но и служит источником дополнительного рассеянного света, снижающего контраст изображения [1]. Линзы коллектора такого осветительного устройства имеют достаточно нетехнологичную (трудоемкую в изготовлении) форму [2, 3]. Различие в задней числовой апертуре применяемых объективов приводит к различию в несколько раз освещенности образованного ими изображения. Таким образом, анализ проблем согласования параметров различных устройств микроскопа и поиск путей их решения представляются весьма актуальными.

Анализ оптических параметров основных осветительных устройств
современного микроскопа

Световой поток, формируемый осветительным устройством, должен заполнять телесный угол, определяемый передней апертурой объектива, в пределах наблюдаемой поверхности предмета. Таким образом, оптические параметры осветительного устройства должны быть таковы, чтобы формируемый им световой поток был равен

$$d\Phi_s = d\Phi_{p \max} = \pi L_0 n_p^2 \sin^2 \sigma_{p \max} dS_{p \max}, \quad (1)$$

где $\pi \sin^2 \sigma_{p \max}$ – телесный угол, соответствующий максимальной величине апертурного угла $\sigma_{p \max}$ объектива из комплекта для конкретного микроскопа; $dS_{p \max}$ – наибольшая площадь поверхности наблюдаемого предмета. Полагая в (1) $dS_{p \max} = \pi y_{p \max}^2$, получаем

$$J_{\max} = y_{p \max} n_p \sin^2 \sigma_{p \max}, \quad (2)$$

где J_{\max} – инвариант Лагранжа–Гельмгольца, величина которого остается неизменной для всех оптически сопряженных плоскостей оптической системы.

Предположим, что удалось создать универсальное осветительное устройство, удовлетворяющее условию (2). Тогда каждый объектив комплекта будет использовать лишь часть светового потока, формируемого коллектором, равную [4] $k_{\text{эф}} = \left(\frac{J_i}{J_{\max}} \right)^2$, где $J_i = n_{pi} y_{pi} \sin^2 \sigma_{pi}$.

Для комплекта объективов микроскопа серии БИОЛАМ имеем [2, 3]: $J_{\max} = 1,125$, $J(\text{ОХП}-10\text{П}) = 0,18$, $J(\text{ОХ}-30) = 0,14625$, $J(\text{ОХ}-32) = 0,1125$. При этом $k_{\text{эф}}(\text{ОХП}-10\text{П}) = 0,0256$, $k_{\text{эф}}(\text{ОХ}-30) = 0,0169$, $k_{\text{эф}}(\text{ОХ}-32) = 0,01$.

В современных микроскопах для освещения предмета в проходящем свете используется система, состоящая из двух оптических элементов: коллектора, расположенного вблизи источника света, и конденсора, находящегося перед исследуемым предметом, как показано на рис. 1. При такой схеме осветительного устройства параметры коллектора должны соответствовать значению инварианта J_{\max} . Для приведенного комплекта микрообъективов $J_{\max} = 1,125$. Вполне очевидно, что чем больше поперечное увеличение изображения предмета, образованного микрообъективом, тем меньше должен быть диаметр открытой полевой диафрагмы при одном и том же конденсоре; с уменьшением отверстия полевой диафрагмы световой поток, поступающий непосредственно в осветительное устройство, существенно

уменьшается. И, тем не менее, рассеянный внутренними поверхностями корпуса осветительного устройства и закрытой частью апертурной диафрагмы конденсора избыточный свет, а также свет, отраженный преломляющими поверхностями оптической системы конденсора, образуют световое поле (засветку закрытой части полевой диафрагмы корпуса вне ее), угловая величина которого превышает угловое поле конденсора, что, в конечном счете, приводит к засветке изображения, образованного микрообъективом. Возможность наблюдения подобной засветки казалась бы маловероятной, если бы не результаты исследований, приведенных в работе [5].

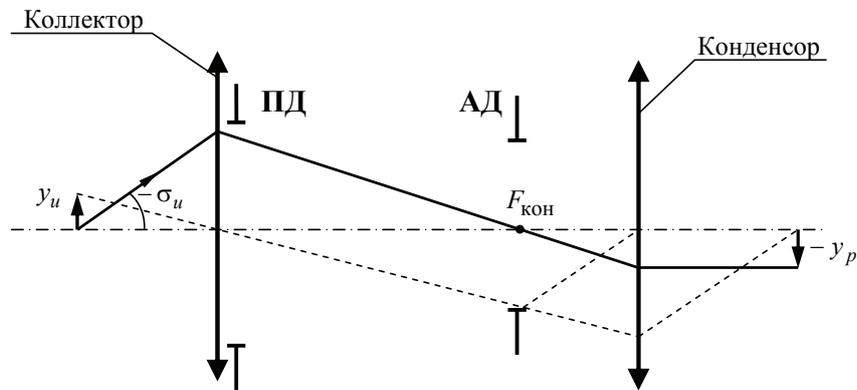


Рис. 1. Схема оптики осветительного устройства микроскопа для освещения предмета по методу Келера

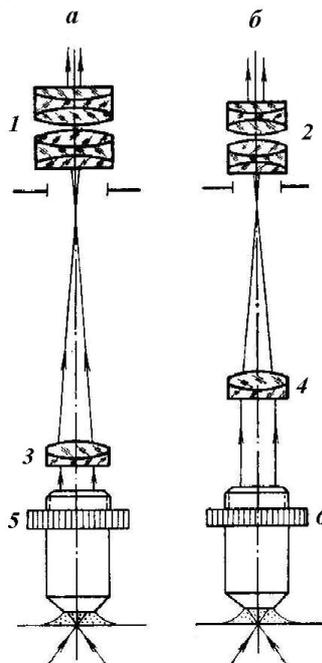


Рис. 2. Схема установки в проходящем свете: 1 – компенсационный окуляр, $\Gamma_1 = 12,5^\times$; 2 – компенсационный окуляр, $\Gamma_2 = 20^\times$; 3, 4 – дополнительные линзы, $f'_1 = 250$ и 164 мм соответственно; 5, 6 – планпохроматы, $f' = 2,5$ мм, $A = 1,25$

Исследования качества изображения, описанные в этой работе, выполнялись на установке с одним и тем же объективом-планпохроматом масляной иммерсии с фокусным расстоянием, равным 2,5 мм, и числовой апертурой $A = 1,25$, рассчитанным на длину тубуса «бесконечность», в сочетании с дополнительными ахроматическими линзами, фокусные расстояния которых $f'_1 = 250$ мм и $f'_2 = 164$ мм, как показано на рис. 2, а, б, и с широкоугольными компенсационными окулярами $\Gamma_1 = 12,5^\times$ и $\Gamma_2 = 20^\times$ соответственно. В результате проведенных исследований показано, что оптическая система с ахроматической линзой при $f' = 250$ мм и окуляром при $\Gamma = 12,5^\times$ формирует изображение более высокого качества, чем при другом варианте системы. В рассматриваемом случае $V_1 = -100^\times$, а $V_2 = -65,6^\times$. Таким образом, при первом варианте оптической системы наблюдательной ветви микроскопа площадь поверхности наблю-

даемого предмета в 2,3 раза меньше, чем при втором. Следовательно, при втором варианте системы в осветительное устройство микроскопа поступает в 2,3 раза больше света, чем при первом. За неимением другой причины следует признать, что более высокое качество изображения при наблюдении с помощью оптической системы первого варианта по сравнению с системой второго варианта определяется меньшей засветкой изображения рассеянным светом.

Композиция и синтез принципиальных схем оптических систем осветительных устройств микроскопа

Эффективность использования светового потока можно существенно повысить, если применить систему переменного увеличения. Для приведенного комплекта микрообъективов при съемной линзе конденсора достаточно получить две пары дискретных значений поперечного увеличения (в изображении источника света и полевой диафрагмы) при неизменном расстоянии между предметом и изображением. Эту задачу можно решить, применив одиночный оптический компонент, который обладает необходимыми свойствами системы переменного увеличения.

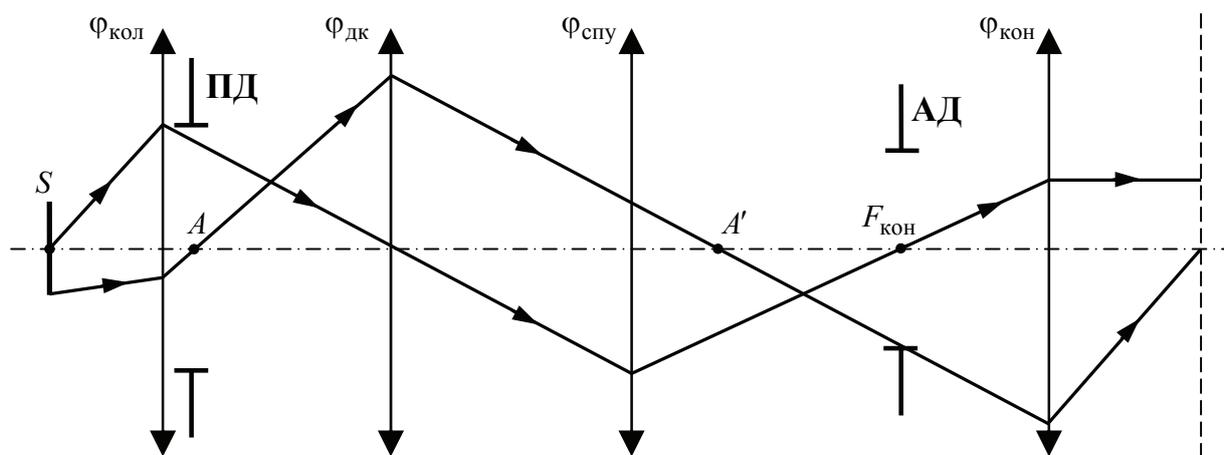


Рис. 3. Схема осветительного устройства со встроенным компонентом $\Phi_{\text{дк}}$

Чтобы в оптическую схему осветительного устройства встроить систему переменного увеличения $\Phi_{\text{спу}}$, необходим дополнительный компонент $\Phi_{\text{дк}}$, как показано на рис. 3. При этом коллектор $\Phi_{\text{кол}}$ изображает источник излучения S вблизи дополнительного компонента $\Phi_{\text{дк}}$, а компонент $\Phi_{\text{спу}}$ изображает его в плоскости апертурной диафрагмы АД (входного зрачка) конденсора $\Phi_{\text{кон}}$. Полевая диафрагма ПД, расположенная вблизи коллектора, дополнительным компонентом изображается в плоскости предмета одной из пар оптически сопряженных плоскостей компонента $\Phi_{\text{спу}}$, а соответствующая ей плоскость изображения формируется конденсором $\Phi_{\text{кон}}$ в плоскости предмета микрообъектива.

В состав исследовательских моделей микроскопа входит, как правило, ряд комплектов объективов, различающихся как характером коррекции aberrаций, так и значениями параметров. Поэтому в этом случае для построения оптической системы эффективного осветительного устройства необходима система непрерывного изменения увеличения. При сравнительно малых перепадах увеличения изображения при построении оптической системы осветительного устройства микроскопа может найти применение трехкомпонентная система переменного увеличения, например, типа «коллектив» [6, 7]. Такая система переменного увеличения обладает двумя парами оптически сопряженных точек, расстояние между которыми не изменяется при изменении увеличения изображения. Одна пара представляет собой действительное изображение действительного предмета, а другая пара – мнимое изображение мнимого предмета. Для формирования мнимого предмета в схеме осветительного устройства с системой переменного увеличения необходим дополнительный компонент (линза) $\Phi_{\text{дк}}$, как показано на рис. 4. На этом рисунке изображение S' источника света S , образованное коллектором $\Phi_{\text{кол}}$, расположено вблизи дополнительного компонента $\Phi_{\text{дк}}$. Система переменного увеличения $\Phi_{\text{спу}}$ совместно с компонентом $\Phi_{\text{дк}}$ изображает его в плоскости апертурной диафрагмы АД (входного зрачка) конденсора $\Phi_{\text{кон}}$. Полевая диафрагма ПД, расположенная вблизи коллектора, дополнительным компонентом изображается в плоскости мнимого

предмета системы $\varphi_{\text{спу}}$, образующей изображение ее в плоскости предмета конденсора $\varphi_{\text{кон}}$, плоскость изображения которого расположена в плоскости предмета микробиъективов.

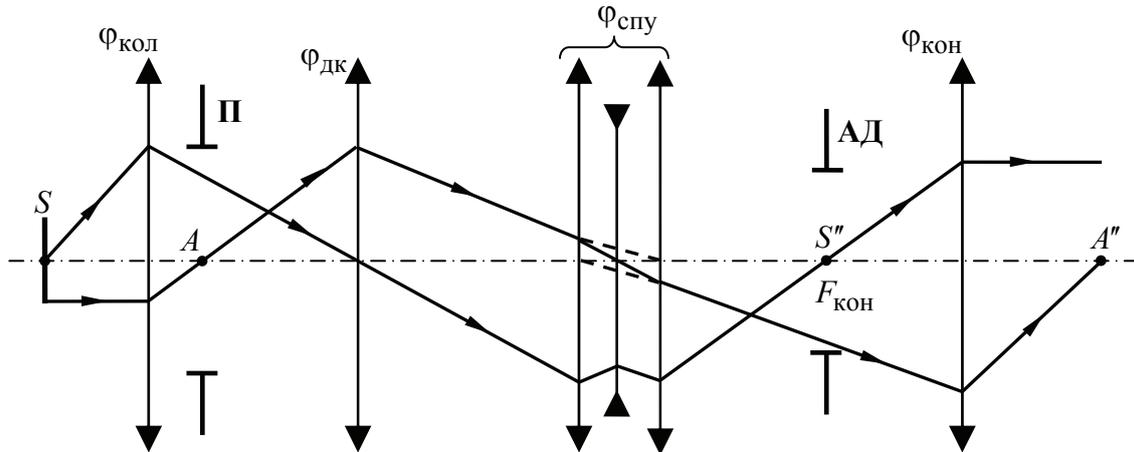


Рис. 4. Схема осветительного устройства микроскопа с оптической системой переменного увеличения для освещения по методу Келера

В трехкомпонентной системе переменного увеличения обозначим $\varphi_1 = \varphi_3 = \varphi_0$, $\varphi_2 = \varphi_k$. В начальном положении поперечное увеличение изображения, образованного трехкомпонентной системой переменного увеличения типа «коллектив», $V_n = 1^*$. При этом расстояние между компонентами $d_1 = d_2 = d_0$. Для расчета параметров системы в качестве исходного параметра удобно использовать величину поперечного увеличения V_0 изображения, образованного первым компонентом в начальном положении системы [7]. При одновременном смещении крайних компонентов вдоль оптической оси на расстояние Δ принципиальную схему рассматриваемой оптической системы можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi_0 \\ d_1 &= d_0 - \Delta \\ \varphi_2 &= \varphi_k \\ d_2 &= d_0 + \Delta \\ \varphi_3 &= \varphi_0 \end{aligned}$$

Положение двух пар оптически сопряженных осевых точек, расстояние между которыми не изменяется при смещении крайних компонентов системы на предельную величину $\Delta = \Delta_0$, определяется выражениями вида [6]

$$a_{011} = \frac{d_0}{V_0}, \quad a_{012} = \frac{1 + V_0(1 - V_0)(1 + \tilde{\Delta}_0^2)}{2V_0^2 - 1} d_0, \quad \text{где } \tilde{\Delta}_0 = \frac{\Delta_0}{d_0}.$$

При этом расстояние между оптически сопряженными точками равно $L_{01} = -2 \frac{1 - V_0}{V_0} d_0$, $L_{02} = 2 \frac{2(1 + V_0) + V_0(1 + \tilde{\Delta}_0^2)}{1 - 2V_0^2} (1 - V_0) d_0$, а оптические

силы компонентов равны $\tilde{\varphi}_0 = \varphi_0 d_0 = 1 - V_0$, $\tilde{\varphi}_k = \varphi_k d_0 = -\frac{2}{1 - V_0} \frac{V_0^3}{(1 + V_0)^2 - V_0^2 \tilde{\Delta}_0^2}$. И, наконец, при

$$\tilde{a}_{01} = \tilde{a}_{011} = \frac{a_{011}}{d_0} = \frac{1}{V_0} \text{ перепад увеличения изображения определяется выражением } \mu = 1 + \frac{4V_0(1 + V_0)\tilde{\Delta}_0}{(1 + V_0 - V_0\tilde{\Delta}_0)^2}.$$

Вполне очевидно, что из-за габаритных ограничений осуществить условие $\tilde{\Delta}_0 = 1$ невозможно. Принимаем $V_0 = 0,65$. Тогда при $\mu = 4$ получаем $\tilde{\Delta}_0 = 0,8462$. При этом $\tilde{a}_{011} = 1,5385$, $\tilde{a}_{012} = -8,9703$; $\tilde{a}_{011} - \tilde{a}_{012} = 10,5088$. В рассматриваемом случае $a_{011} - a_{012} = 125$ мм. Отсюда находим, что $d_0 = 11,895$ мм. Оптические силы компонентов $\tilde{\varphi}_0 = 0,35$, $\varphi_0 = 0,02942$ мм⁻¹; $\tilde{\varphi}_k = 0,64847$, $\varphi_k = 0,05452$.

Полученные значения величин определяют оптическую систему осветительного устройства микроскопа, конструктивные параметры которой (без коллектора и без конденсора) и остаточные aberrации при двух предельных положениях крайних компонентов $\varphi_{\text{спу}}$ приведены в табл. 1–3. Обозначения величин соответствуют приведенным в [8].

Номер поверхности	Радиусы, мм	Диаметр, мм	Марки стекол	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
1	20,910	2,00	ВОЗДУХ	1,000000		
2	0,000	20,41–0,28	ТК16	1,615192	7,04	0,30
3	–22,820	1,00	ВОЗДУХ	1,000000	6,71	0,00
4	22,820	0,28–20,41	Ф1	1,616878	3,41	–0,06
5	0,000	2,00	ВОЗДУХ	1,000000	3,61	0,07
6	–20,910		ТК16	1,615192	3,69	0,00
			ВОЗДУХ	1,000000	4,16	–0,10

Таблица 1. Конструктивные параметры

S_0	S_{p0}	S'_{p0}	S'_0	V_0	V_{p0}	
28,35	–96,64	117,0	–8,231	0,50011	–2,004	
$y=0$	m	$\delta s'$	$tg\sigma'_s$	$\delta g'$	W	$\eta, \%$
	–8,77	–0,0129	–0,142	0,00184	–0,126	–0,516
	–7,60	–0,0102	–0,123	0,00125	–0,0725	–0,385
	–6,20	–0,0071	–0,0998	0,000707	–0,0330	–0,255
	–4,39	–0,0037	–0,0704	0,000260	–0,0085	–0,127
y	S	S'	$tg\sigma'_s$	$\delta g'$	ДИС	
2,00	–96,64	115,3	0,00809	0,999	–0,0012	
y	m	$tg\sigma'$	$\delta tg\sigma'_s$	$\delta g'$	W	
2,00	–8,77	–0,135	–0,143	–0,0191	1,89	
	–6,20	–0,0923	–0,100	–0,0107	0,769	
	6,20	0,108	0,100	–0,0048	–0,171	
	8,77	0,150	0,142	–0,0125	–0,800	
y	M	$tg\sigma'_s$	$tg\sigma'_m$	$\delta G'$	W	$\delta g'$
2,00	–8,77	0,00798	–0,142	0,000202	0,0810	–0,0052
	–6,20	0,00804	–0,1000	–0,00042	0,0686	–0,0026

Таблица 2. Остаточные aberrации ($d = 0,28$)

S_0	S_{p0}	S'_{p0}	S'_0	V_0	V_{p0}	
8,230	–116,8	96,70	–28,35	1,9997	–0,5003	–28,35
$y=0$	m	$\delta s'$	$tg\sigma'_s$	$\delta g'$	W	$\eta, \%$
	–8,77	–0,0148	–0,0350	0,000518	–0,0084	0,126
	–7,60	–0,0112	–0,0303	0,000340	–0,0048	0,0946
	–6,20	–0,0075	–0,0248	0,000187	–0,0021	0,0630
	–4,39	–0,0038	–0,0175	0,0000668	–0,00054	0,0315
y	S	S'	$tg\sigma'_s$	$\delta g'$	ДИС	
2,00	–116,8	94,94	0,0326	4,02	0,0195	
y	m	$tg\sigma'$	$\delta tg\sigma'_s$	$\delta g'$	W	
2,00	–8,77	–0,0020	–0,0346	–0,0048	0,322	
	–6,20	0,00806	–0,0245	–0,0067	0,211	
	6,20	0,0572	0,0246	0,0224	0,444	
	8,77	0,0673	0,0347	0,0361	0,980	
y	M	$tg\sigma'_s$	$tg\sigma'_m$	$\delta G'$	W	$\delta g'$
2,00	–8,77	0,0326	–0,0349	–0,0059	0,194	0,00519
	–6,20	0,0326	–0,0247	–0,0043	0,0988	0,00259

Таблица 3. Остаточные aberrации ($d = 20,41$)

Заключение

Показана принципиальная возможность построения оптической системы осветительного устройства микроскопа на основе применения системы переменного увеличения, позволяющего более чем в 10 раз повысить эффективность использования светового потока. Естественное усложнение схемы осветительного устройства вполне компенсируется снижением требований к параметрам элементов. Представлены возможные конструкторские решения этой задачи.

Литература

1. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. – Л.: Машиностроение. ЛО, 1989. – 221 с.

2. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. Расчет и проектирование. – Л.: Машиностроение, 1976. – 432 с.
3. Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И., Федин Л.А. Микроскопы. – Л.: Машиностроение, 1969. – 512 с.
4. Виноградова О.А., Зверев В.А., Точилина Т.В., Рамин Хои. Система переменного увеличения в осветительном устройстве микроскопа // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73. – № 10. – С. 24–28.
5. Андреев Л.Н., Грамматин А.П., Соколова Т.И. Влияние распределения увеличения в микроскопе между объективом и окуляром на качество изображения // ОМП. – 1979. – № 1. – С. 51–52.
6. Журова С.А., Зверев В.А. Основы композиции принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66. – № 10. – С. 68–86.
7. Виноградова О.А., Точилина Т.В. Эффективность осветительного устройства светового микроскопа. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2005. – Выпуск 18. – С. 248–254.
8. Вычислительная оптика. Справочник. Под общ. ред. М.М. Русинова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 423 с.

Точилина Татьяна Вячеславовна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tvtochilina@mail.ru

УДК 681.7.06; 681.7.068.4

РАСЧЕТ КАНАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ПРОИЗВОЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭРМИТОВОГО НАБОРА В-СПЛАЙНОВ

Г.Б. Дейнека, В.С. Серебрякова

Приведена универсальная методика расчета параметров канальных волноводов с произвольным распределением показателя преломления из первых принципов. В качестве алгоритма предложен метод конечных элементов с использованием эрмитового набора В-сплайнов. Приведены результаты расчета предлагаемым методом полоскового оптического волновода с заданным профилем показателя преломления различной геометрической конфигурации. Произведено сравнение полученных результатов с результатами расчетов известными численными методиками.

Ключевые слова: канальные оптические волноводы, профиль показателя преломления, метод конечных элементов, В-сплайны, компьютерное моделирование.

Введение

Канальные оптические волноводы лежат в основе большинства современных устройств интегральной оптики (переключатели, разветвители, модуляторы, поляризаторы, мультиплексоры и др.). Расчет параметров таких волноводных структур является ключевым при проектировании и создании интегрально-оптических элементов с заданными свойствами (геометрическая конфигурация, профиль показателя преломления, размер поля моды, потери, коэффициент деления для ветвителей, количество мод, поддерживаемых волноводом, и т.д.). Существуют различные методы численного моделирования распространения излучения в канальных волноводах, такие как метод конечных элементов [1–7], метод конечных разностей [8–9], метод лучевого распространения [10], ВКБ метод [11], метод эффективного показателя преломления [12], векторные методы [13–14] и др. [15–16], но каждый из них имеет свои ограничения в области применения в зависимости от постановки задачи. Программные платформы, реализующие в виде компьютерного моделирования эти методы, в основном используют весьма трудоемкий и неоднозначный способ построения неравномерных сеток с треугольными элементами.

В настоящей работе предлагается метод расчета канальных оптических волноводов, использующий равномерную сетку финитных элементов. Физическая модель основана на решении уравнения Гельмгольца и является универсальным средством для расчета волноводов различной конфигурации. Эта методика позволяет рассчитывать такие параметры, как количество мод, интеграл перекрытия полей, а также визуализировать поля в сечении волновода.

Теоретическая часть

В работе использован эрмитовый базис В-сплайнов [17–18]. Эрмитовый набор функций представляет собой кусочно-гладкие функции, образованные из полиномов третьего порядка. Набор состоит из двух функций f_0 и f_1 , центрированных на каждом узле в одном измерении. Одним из важнейших свойств этого базиса является возможность применения его для аппроксимации различных функций без решения

различного рода матричных задач. В одномерном случае набор В-сплайнов $f(x)$ состоит из двух функций, центрированных на каждом узле:

$$f^0(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } |x| > 1, \\ (x-1)(x-1)(1+2x), & \text{при } x \geq 0, \\ (1+x)(1+x)(1+2x), & \text{при } x < 0, \end{cases} \quad f^1(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } |x| > 1, \\ (1-x)(1-x)x, & \text{при } x \geq 0, \\ (1+x)(1+x)x, & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

Так, если во всех узлах j известны значения некоторой функции $F(j)$ и ее производной $F'(j)$, то эти величины и являются коэффициентами разложения функции f по эрмитовому базису В-сплайнов:

$$F(x) \approx \sum_j F_j f^0(x-j) + \sum_j F'_j f^1(x-j)$$

Вид функций эрмитового набора f^0 и f^1 и их расположение по узлам представлены на рис. 1.

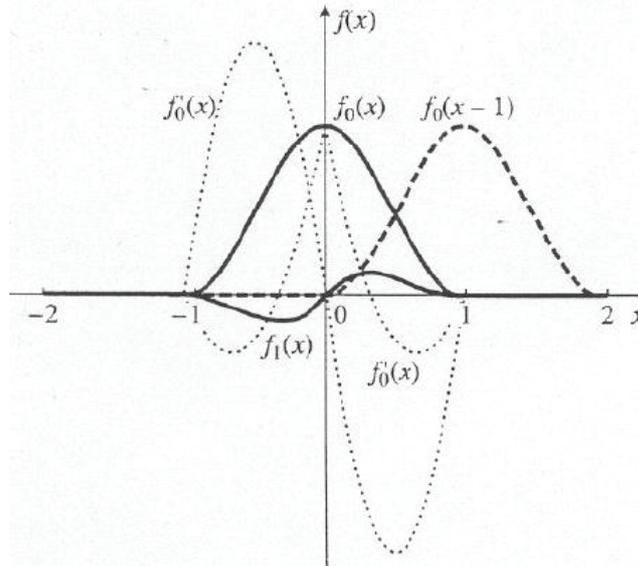


Рис. 1. Общий вид функций эрмитового набора В-сплайнов и их производных

Аппроксимационные свойства этих базисных функций исследованы на широком спектре одно- и двумерных задач квантовой механики [18, 19] и показали хорошие результаты как при прямых аппроксимациях, так и при использовании различных вариационных принципов. Упоминание квантовой механики не случайно, так как уравнение Гемгольца в оптике, которое является основой моделирования оптических волноводов, полностью аналогично уравнению Шредингера в квантовой механике. Использование описанных выше сплайнов возможно как в аналитическом (в основном при интегрировании со степенными функциями), так и в численном виде. В последнем случае для интегрирования используется семиточечная формула [20], которая дает точные результаты при интегрировании полиномов до седьмой степени включительно. Особенно эффективно применение базиса В-сплайнов при решении двумерных задач. Обычная практика применения треугольных квадратичных элементов [1–3, 8, 9, 13, 14] в качестве финитных функций связана с весьма неоднозначным процессом разбиения пространства на треугольные области. Конструирование финитных элементов более высокого порядка, чем линейные, требует владения весьма трудоемкой техникой. Применение в качестве базиса гладких В-сплайнов избавляет от необходимости построения на каждом узле индивидуальной базисной функции и сводится к построению равномерной сетки, в каждом узле которой находится произведение функций типа [19]

$$f_i^{h1}(x) f_i^{h2}(y) = \Psi_{i,j}^{h1,h2} = \Psi_k,$$

где k – обобщенный индекс ($h1, h2, i, j$). Общий вид двумерных В-сплайнов приведен на рис. 2. В двумерном случае в одном узле находятся четыре сплайна.

Как уже было отмечено, с развитием техники оптической связи большое распространение получили волноводные оптические элементы, связанные с разветвлением, модуляцией, изменением поляризации, фазы и других параметров оптического сигнала. Основой для изготовления таких интегрально-оптических элементов служат каналные (или полосковые) волноводы, когда показатель преломления волноводного слоя полоски превышает показатель преломления подложки. Важной задачей является определение модового состава и формы распределения поля в основных модах. Последнее особенно важно для определения потерь при стыковке различных оптических элементов между собой или с оптическими волокнами. Пример каналного оптического волновода показан на рис. 3.

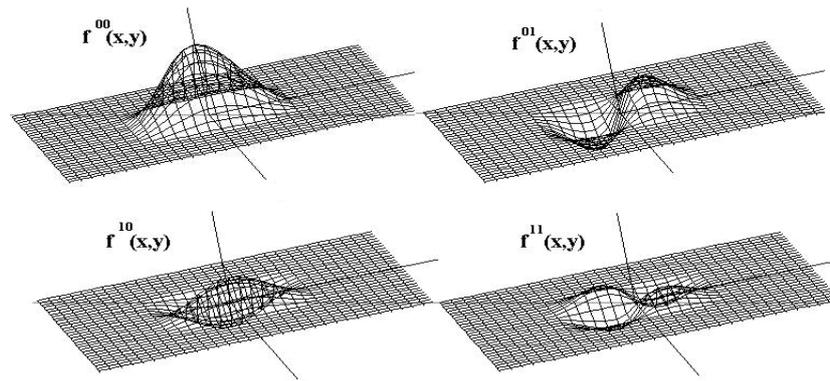


Рис. 2. Набор двумерных В-сплайнов

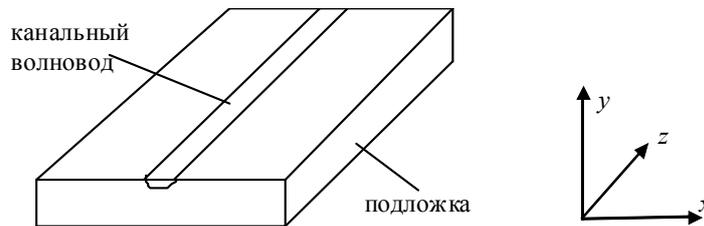


Рис. 3. Простейший вид канального волновода на подложке

Рассмотрим световую волну, распространяющуюся по оптическому волноводу с произвольным показателем преломления в направлении z , а вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости (x,y) :

$$E(x, y, z) = E_m(x, y) \exp(i(k_z z - \omega t)),$$

где $k_z = n_{eff} k_0$ – постоянная распространения, $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число в свободном пространстве. При этом $E_m = (x, y)$ является решением уравнения Гельмгольца [21]

$$HE = \gamma E,$$

где $H = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_0 n(x, y)^2$, $\gamma = k_0 n_{eff}^2$, $n = n(x, y)$ – профиль показателя преломления в плоскости XOY ,

n_{eff} – эффективный показатель преломления. Представление $E(x, y)$ в виде $E(x, y) = \sum_k C_k \psi_k(x, y)$ и ведет к матричной обобщенной задаче на собственные значения и собственные функции [19]:

$$\sum_{k=0}^M C_k H_{n,k} = \gamma S_{n,k} C_n,$$

где $H_{n,k} = \int_{x_{min} \cdot y_{min}}^{x_{max} \cdot y_{max}} \psi_n(x, y) H \psi_k(x, y) dy dx$, $S_{n,k} = \int_{x_{min} \cdot y_{min}}^{x_{max} \cdot y_{max}} \psi_n(x, y) \psi_k(x, y) dy dx$, M – число базисных функций.

Результаты моделирования

На рис. 4 приведен тестовый пример распределения показателя преломления канального волновода для оценки точности применяемого метода вычисления размера модовых полей и распределений интенсивности светового поля [3].

Пусть показатель преломления подложки $n_s = 3,40$, волновода – $n_f = 3,44$, а показатель преломления покровного слоя воздуха $n_c = 1$, длина волны $\lambda = 1,55$ мкм; $W = 3,0$, $h+t = 1$, $X_s = 3,0$, $Y_s = 5$, $Y_c = 1$ – линейные размеры в микрометрах. В таблице приведено сравнение результатов наших расчетов эффективного показателя преломления n_{eff} с результатами тестовых расчетов, полученных различными численными методами. В таблице приняты следующие обозначения: VFEM (Vector-H finite element method) – векторный метод конечных элементов с триангулярной неравномерной сеткой [14]; SDFM (Semivectorial polarized finite difference method) – векторный метод конечных разностей [13]; SFEM (Scalar finite element method) – скалярный метод конечных элементов с триангулярной неравномерной сеткой [3], в котором

число треугольных элементов $N_e = 240$, число искоемых параметров $N_c = 519$; B-spline – метод конечных элементов с равномерной сеткой на базисе двумерных B-сплайнов (рис. 2), где число базисных функций (искомых параметров) $N_e = 480$, число узлов $N_c = 120$. Сравнение показывает, что B-сплайны позволяют использовать равномерную сетку с точностью не хуже, чем в случае специального подбора треугольной неравномерной сетки. При этом увеличение точности определяется только одним параметром – количеством узлов, а трудоемкость задачи, которая определяется числом искоемых параметров, гораздо меньше, чем в случае специально подобранной сетки.

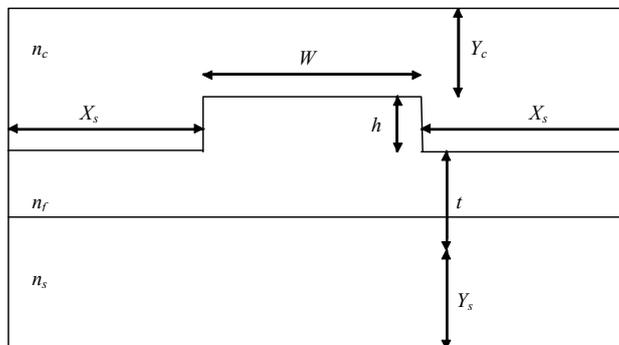


Рис. 4. Тестовый пример распределения $n(x,y)$

t , МКМ	n_{eff}			
	VFEM	SFDM	SFEM	B-spline
0	3,4121	3,41188	3,41204	3,411988
0,1	3,4122	3,41200	3,41214	3,41209
0,2	3,41235	3,41217	3,41229	3,412254
0,3	3,41255	3,41240	3,41249	3,412470
0,4	3,41285	3,41271	3,41276	3,412761
0,5	3,41315	3,41310	3,41311	3,413136
0,6	3,41365	3,41358	3,41353	3,413572
0,7	3,4141	3,41415	3,41404	3,414028
0,8	3,41475	3,41485	3,41468	3,414670
0,9	3,4156	3,41568	3,41553	3,415409

Таблица. Значения эффективного показателя преломления для основной моды тестового распределения показателя преломления $n(x,y)$, рассчитанные различными методами

На рис. 5 приведено рассчитанное с помощью методики B-сплайнов распределение интенсивностей поля в канальных волноводах с различными профилями показателя преломления (рис. 4).

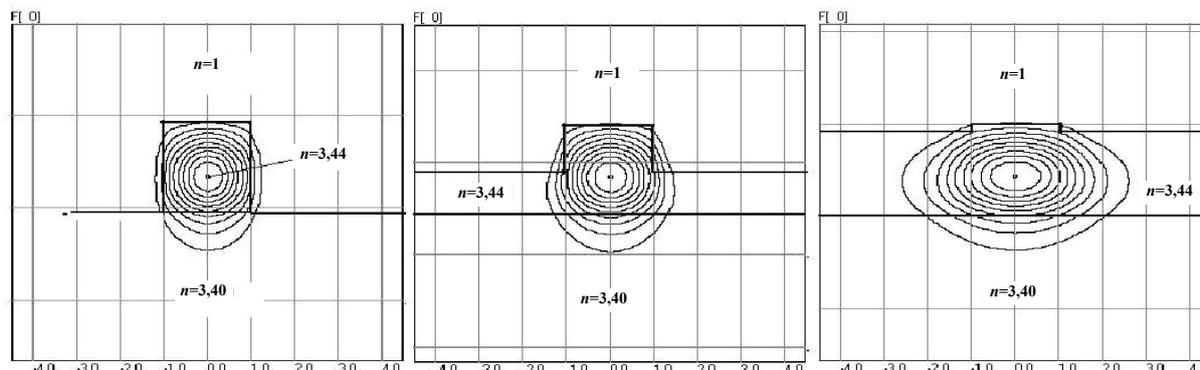


Рис. 5. Распределение интенсивности поля для различных профилей показателя преломления полоскового волновода

Заключение

Методика B-сплайнов позволяет рассчитывать волноводы с произвольным профилем показателя преломления и произвольной геометрией построения световодной структуры. Точность расчетов методом B-сплайнов сопоставима с точностью результатов известных проверенных методик (вектор-

ный/скалярный метод конечных элементов, метод конечных разностей и др.), а в некоторых случаях даже превосходит их.

Основным достоинством предлагаемой методики является применение в качестве базиса эрмитового набора гладких В-сплайнов, аппроксимирующие свойства которых позволяют использовать равномерную сетку, где в каждом узле находятся одномерные базисные функции. Это, на наш взгляд, имеет преимущество перед обычной практикой применения треугольных квадратичных элементов в качестве финитных функций, связанной с весьма неоднозначным процессом разбиения пространства на треугольные области. Таким образом, метод В-сплайнов является универсальным средством для расчета волноводов с произвольным распределением показателя преломления, это высокоточный и производительный метод.

Литература

1. Koshiha M., Hayata K., Suzuki M. Approximate scalar finite-element analysis of anisotropic optical waveguides // Electronics Lett. – 1982. – V. 18. – № 10. – P. 411–412.
2. Koshiha M., Hayata K., Suzuki M. Improved finite-element formulation in terms of the magnetic field vector for dielectric waveguide // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1985. – V. MTT-33. – № 3. – P. 227–232.
3. Koshiha M., Saitoh H., Eguchi M., Hirayama K. Simple scalar finite element approach to optical rib waveguide // IEEE Proc.-J. – 1992. – V.139. – № 2. – P. 166–171.
4. Rahman B.M.A., Davies J.B. Finite-Element Solution of Integrated Optical Waveguides // J. of lightwave technology. – 1984. – V. LT-2. – № 5. – P. 682–687.
5. Franco M. A. R., Passaro A., Neto F.S. Modal Analysis of Anisotropic Diffused-Channel Waveguide by a Scalar Finite Element Method // IEEE Transactions on Magnetics. – 1998. – V. 34. – № 5. – P. 2783–2786.
6. Mabaya N., Lagasse P.E., Vandenbulcke P. Finite element analysis of optical waveguide // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 1981. – V. MTT-29. – № 6. – P. 600–605.
7. Popescu V.A. Determination of propagation constants in a TiLiNbO₃ optical waveguide by using finite element and variational methods // Optical Communications. – 2005. – V. 250. – P. 274–279.
8. Vassallo C. Improvement of finite difference methods for step-index optical waveguide. // IEEE Proc.-J. – 1992. – V.139. – № 2. – P. 137–142.
9. Chaudhuri P.R., Ghatak A.K., Pal B.P., Lu C. Fast convergence and higher-order mode calculation of optical waveguide: perturbation method with finite difference algorithm // Optics and Laser technology. – 2004. – V. 37. – P. 61–67.
10. Wachter C., Palme M., Schreiber P. Applications of standard BPM algorithms // SPIE. – 1997. – V. 2997. – P. 220–231.
11. Zh. Cao, Li Zhan, Y. Chen. Improved WKB method // SPIE. – 1996. – V. 2891. – P. 289–295.
12. Chakraborty R., Biswas J.C., Lahiri S.K. Analysis of directional coupler electro-optic switches using effective-index-based matrix method // Optics Communications. – 2003. – V. 219. – P. 157–163.
13. Stern M.S. Semivectorial polarized finite difference method for optical waveguide with arbitrary index profile // IEE Proc.-J, Optoelectron. – 1988. – V. 135. – P. 56–63.
14. Rahman B.M.A., Davies J.B. Vector-H finite element solution of GaAs/GaAlAs rib waveguide// IEE Proc.-J, Optoelectron. – 1985. – V. 132. – P. 349–353.
15. Sharma A., Meunier J.-P. On the modal analysis of optical waveguides using approximate methods // Optics Communications. – 2007. – V. 281. – P. 592–599.
16. Lo K.-M., Li E.H. Cutoff frequency of quasi-vector mode of optical waveguide with arbitrary refractive index profile // SPIE. – 1998. – V. 3283. – P. 921–929.
17. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. – М: Наука, 1981.
18. Дейнека Г.Б. Применение эрмитового базиса В-сплайнов для решения двухатомных молекулярных задач методом Хартри–Фока–Дирака // Оптика и спектроскопия. – 1998. – Т. 84. – № 2. – С. 198–203.
19. Deineka G.B. 2D model of H⁺ and H(1s) collision: application to charge transfer // International Journal of Quantum Chemistry. – 2006. – V. 106. – № 10. – P. 2262–2267.
20. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 831 с.
21. Тамир Т. Волноводная оптоэлектроника. – М: Мир, 1999. – 574 с.

Дейнека Геннадий Борисович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, gdeineka@yahoo.com

Серебрякова Владлена Сергеевна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vlladlenna@mail.ru

УДК 535.1

ГЕНЕРАЦИЯ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ КРИСТАЛЛА ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

О.А. Мохнатова, С.Э. Путилин, В.Г. Беспалов, С.А. Козлов

Представлены экспериментальные результаты отражения фемтосекундного излучения с плотностью мощности 4 ТВт/см^2 и длительностью около 40 фс от нелинейного кристалла LiF при падении света на границу раздела сред, близком к нормальному. Показано, что при отражении излучения от передней грани кристалла происходит генерация излучения на утроенной частоте, которое регистрировалось в отраженном пучке вместе с излучением основной частоты и энергия которого составляла значение порядка 10^{-4} относительно энергии падающего излучения. Полуширина пространственного распределения светового пучка, отраженного на утроенной частоте излучения, оказывается в три раза уже полуширины пучка, отраженного на основной частоте.

Ключевые слова: предельно короткие импульсы, отражение предельно коротких импульсов, нелинейный кристалл LiF, генерация третьей гармоники.

Введение

В последнее время были созданы и стали доступны фемтосекундные лазерные системы, генерирующие высокоинтенсивные сверхкороткие световые импульсы с плотностью мощности в десятки ТВт/см^2 . Это упростило проведение экспериментов по наблюдению нелинейных эффектов. Одним из таких эффектов является генерация излучения на утроенной частоте при отражении высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов от поверхности диэлектриков [1, 2]. В отличие от этих работ, в которых исследовалась генерация третьей гармоники при отражении от поверхности диэлектрических кристаллов излучения с интенсивностями $15\text{--}150 \text{ ГВт/см}^2$ и длительностями $130\text{--}300 \text{ фс}$, в настоящей работе исследовалось нелинейное отражение более интенсивных (порядка ТВт/см^2) и более коротких (около 40 фс) световых импульсов. Показано, что энергетическая эффективность генерации излучения утроенных частот при отражении высокоинтенсивных фемтосекундных световых импульсов может достигать $1 \cdot 10^{-4}$.

Экспериментальные результаты

В экспериментах была использована фемтосекундная лазерная система на кристаллах титан-сапфира с усилением чирпованного импульса с пиковой мощностью 30 ГВт [3]. Система имела следующие параметры: длительность импульса 40 фс , средняя мощность излучения до 75 мВт , энергия одиночного импульса до $1,5 \text{ мДж}$, частота повторения импульсов 50 Гц . Кристалл фтористого лития был выбран из-за большой ширины запрещенной зоны – область прозрачности у него простирается до длин волн 200 нм . Также этот кристалл обладает достаточно большим коэффициентом нелинейного показателя преломления \tilde{n}_2 .

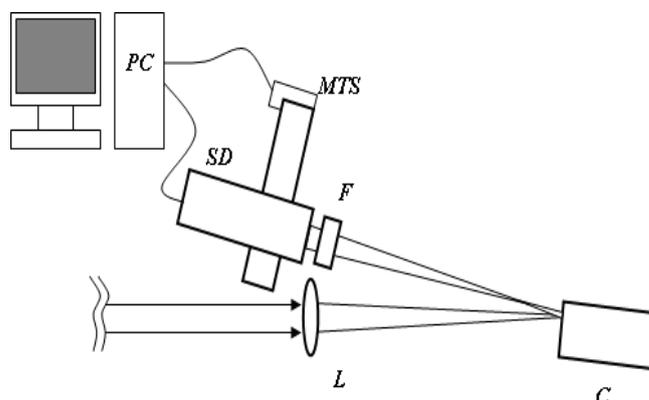


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Излучение от фемтосекундной системы, пройдя линзу L (рис. 1) с фокусным расстоянием 51 см , попадало на переднюю грань кристалла фтористого лития C . Чтобы избежать влияния излучения, отраженного от задней грани, кристалл был наклонен относительно падающего луча (угол падения составлял $5,5^\circ$), а область взаимодействия была максимально приближена к матовой боковой грани кристалла. Фо-

кальная плоскость линзы была расположена на расстоянии 6 см за передней гранью кристалла. Плотность мощности была близка к энергии пробоя, но не превышала ее, и составляла 4 ТВт/см^2 .

Отраженное от кристалла излучение проходило через фильтры УФС1 F суммарной толщиной 10 мм. За фильтрами на линейный транслятор с шаговым двигателем MTS был установлен спектрограф $ASP100 SD$. Работа шагового двигателя линейного транслятора и спектрографа управлялись при помощи компьютера PC . Ширина входной щели спектрометра составляла 12 мкм, и с помощью линейного транслятора можно было провести сканирование с шагом 250 мкм в плоскости падения, получив сечение пространственного распределения отраженного пучка.

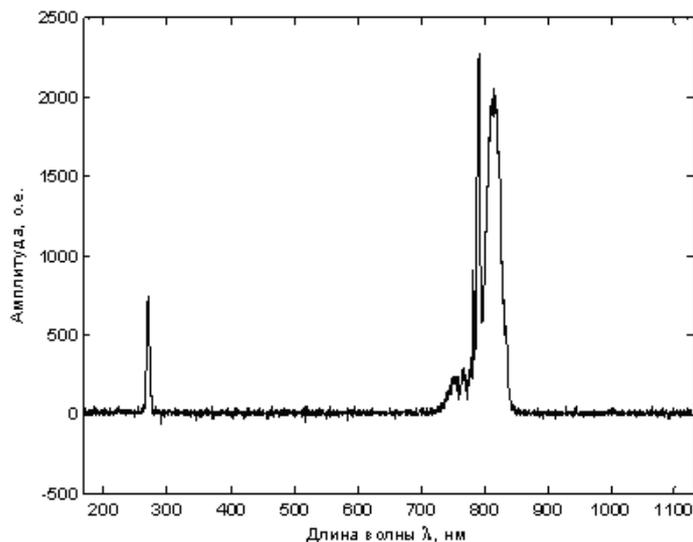


Рис. 2. Спектр отраженного излучения после прохождения фильтров УФС

На рис. 2 представлен спектр излучения, отраженного от передней грани кристалла LiF в центре пучка, на утроенной частоте (расстояние по оси x равно 4,75 мм).

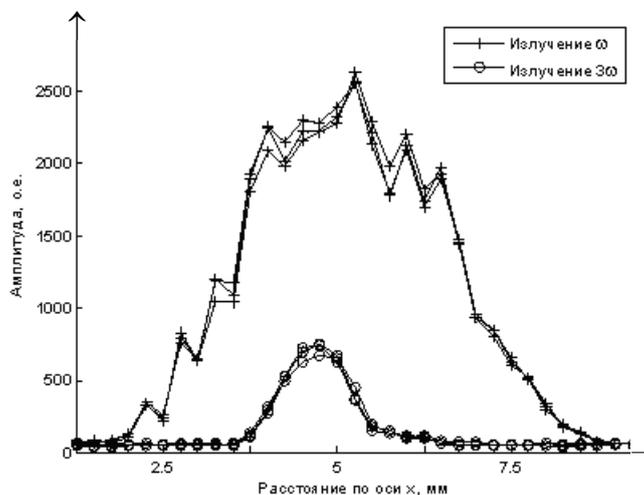


Рис. 3. Сечение пространственного распределения отраженного излучения в плоскости падения

На рис. 3 представлено сечение пространственного распределения излучения, отраженного от кристалла LiF , в плоскости падения, которое было получено сканированием отраженного пятна щелью спектрометра. Для излучения основной частоты и утроенной частоты представлены по три экспериментальных кривые, хорошо согласующиеся между собой. Отклонение от гауссовского распределения, хорошо видимое для основной гармоники, следует отнести к имеющимся дефектам на использованных нами фильтрах. Как видно из рисунка, пятно отраженного на утроенной частоте излучения примерно в три раза уже пятна отраженного излучения основной частоты по полувысоте сигнала (FWHM). Это связано с меньшей длиной волны сгенерированного при отражении излучения на утроенной частоте и с тем, что размер области генерации меньше размера взаимодействия, так как эффект является нелинейным.

Учитывая пропускание УФС-фильтров, можно сказать, что эффективность генерации излучения на утроенной частоте при отражении фемтосекундного лазерного пучка по энергии составляла значение порядка 10^{-4} относительно падающего излучения.

Теоретическое обоснование результатов

В работах [4–6] были получены соотношения, связывающие параметры поля отраженного излучения с характеристиками падающего на нелинейный диэлектрик света, спектр которого может занимать значительную часть диапазона прозрачности диэлектрической среды, для случая нормального падения плоской поперечно однородной волны. Особенностью этих работ было использование непосредственно полевых уравнений при выводе зависимостей, а не уравнений для огибающих, которые становятся неприменимыми в случае лазерных импульсов с широким временным спектром, в том числе содержащих малое число колебаний. В работе [7] также на основе полевых уравнений были получены аналоги формул Френеля для случая отражения от нелинейного диэлектрика поперечно слабонеоднородной (параксиальной) волны со сверхшироким временным спектром.

В работе [7] была выведена зависимость пространственно-временного спектра светового импульса, отраженного от диэлектрической среды с нерезонансной дисперсией и нелинейностью, от параметров пространственно-временного спектра падающего параксиального пучка, временной спектр которого рассматривается сверхшироким, вида

$$G_{ref}(\omega, k_x, k_y) = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \left(1 + \frac{c^2}{n_1 n_2} \frac{k_x^2 + k_y^2}{\omega^2} \right) G_{inc} - \frac{gcS}{3(n_1 + n_2)}, \quad (1)$$

где G_{inc} и G_{ref} – пространственно-временные спектры падающего и отраженного излучения соответственно, $n_1(\omega)$ и $n_2(\omega)$ – линейные показатели преломления граничащих сред, для которых зависимость от частоты имеет вид

$$\begin{cases} n_i(\omega) = N_i + \Delta n_i(\omega), \\ \Delta n_i(\omega) = ca_i \omega^2 - c \frac{b_i}{\omega^2}, \end{cases}$$

N_i , a_i , b_i – константы, характеризующие нерезонансную дисперсию линейного показателя преломления среды, $g = 2\tilde{n}_2 / c$ описывает безынерционную нелинейность поляризационного отклика среды, \tilde{n}_2 – коэффициент нелинейного показателя преломления среды по квадрату поля, c – скорость света в воздухе,

$$\begin{aligned} S(\omega, k_x, k_y) &= \int \int \int_{-\infty}^{\infty} E_{inc}^3(t, x, y) e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} dt dx dy = \\ &= \frac{1}{(2\pi)^6} \int \int \int \int_{-\infty}^{\infty} G_{inc}(\omega - \omega', k_x - k'_x, k_y - k'_y) G_{inc}(\omega' - \omega'', k'_x - k''_x, k'_y - k''_y) \times \\ &\quad \times G_{inc}(\omega'', k''_x, k''_y) d\omega' dk'_x dk'_y d\omega'' dk''_x dk''_y, \end{aligned}$$

E_{inc} – напряженность электрического поля падающей волны.

Пусть поле падающего излучения имеет вид

$$E_{inc}(t, x, y) = E_0 \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_0}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\rho_0}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{y}{\rho_0}\right)^2} \cdot \sin(\omega_0 t), \quad (2)$$

где ρ_0 – поперечный размер пучка, τ_0 – длительность импульса, предполагаемая немногим большей центральной периода колебаний $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$, ω_0 – центральная частота, E_0 – амплитуда. Соответственно, спектр падающего импульса (2) имеет вид

$$G_{inc}(\omega, k_x, k_y) = G_0 e^{-\left(\frac{\rho_0 k_x}{2}\right)^2} e^{-\left(\frac{\rho_0 k_y}{2}\right)^2} \left[e^{-\left(\frac{\tau_0(\omega + \omega_0)}{2}\right)^2} - e^{-\left(\frac{\tau_0(\omega - \omega_0)}{2}\right)^2} \right], \quad (3)$$

где $\tilde{G}_{inc} = \frac{E_0}{2i} \tau_0 \rho_0^2 \pi^{3/2}$. Тогда согласно (1) спектр импульса, отраженного на утроенной частоте, имеет вид

$$G_{3\omega_0}(\omega, k_x, k_y) = -\frac{gcS}{3(n_1 + n_2)} = \frac{F}{n_1 + n_2} \times \tilde{G}_{3\omega_0} e^{-\left(\frac{\rho_0 k_x}{\sqrt{3} \cdot 2}\right)^2} e^{-\left(\frac{\rho_0 k_y}{\sqrt{3} \cdot 2}\right)^2} \left(e^{-\left(\frac{\tau_0(\omega + 3\omega_0)}{\sqrt{3} \cdot 2}\right)^2} - e^{-\left(\frac{\tau_0(\omega - 3\omega_0)}{\sqrt{3} \cdot 2}\right)^2} \right), \quad (4)$$

где $\tilde{G}_{3\omega_0} = \frac{\tilde{G}_{inc}}{4 \cdot 3\sqrt{3}}$, $F = \frac{g}{3} cE_0^2 = \frac{2}{3} \tilde{n}_2 I$ описывает нелинейность отражающей среды (здесь I – интенсивность падающего излучения).

Коэффициент F формулы (4) при указанных параметрах эксперимента ($I = 4 \cdot 10^{12}$ Вт/см²) для кристалла LiF ($N_2 = 1,3871$, $a_2 = 1,94 \cdot 10^{-44}$ с³/см, $b_2 = 3,94 \cdot 10^{-17}$ (с·см)⁻¹ и $\tilde{n}_2 = 9 \cdot 10^{-17}$ см²/Вт) равен $2,4 \cdot 10^{-4}$, из чего можно сделать вывод о высокой степени совпадения полученных в настоящей работе результатов эксперимента и результатов теории, построенной нами в [7].

Заключение

Эффективность генерации излучения на утроенной частоте при отражении фемтосекундного импульса с плотностью мощности 4 ТВт/см² и длительностью 40 фс от нелинейного кристалла LiF составляет величину порядка 10^{-4} относительно падающего излучения. Это означает, что эффективной может оказаться и генерация излучения на комбинационных частотах при одновременном отражении двух фемтосекундных импульсов разной частоты, рассмотренном в [7]. Следовательно, возможно предсказанное в [7] получение отраженных импульсов на новых частотах, причем существенно меньшей длительности, чем у импульсов падающего излучения.

Работа поддержана программой «Развитие научного потенциала высшей школы» (грант РНП 2.1.1.4923) и Российским фондом фундаментальных исследований (грант 08-02-00902), а также грантом Российской научной школы НШ-5707.2010.2.

Литература

1. Liipke G., Bottomley D.J., and van Driel H.M. Second- and third-harmonic generation from cubic centrosymmetric crystals with vicinal faces: phenomenological theory and experiment // J. Opt. Soc. Am. B. – 1994. – Vol. 11. – №1. – P. 33–44.
2. Tsang T. Reflected optical harmonics from dielectric mirrors // App. Optics. – 1994. – Vol. 33. – № 33. – P. 7720–7724.
3. Беспалов В.Г., Киселев В.М., Кисляков И.М. и др. Антистоксовый самосдвиг и уширение спектра излучения фемтосекундного лазера в сильно поглощающей среде // Опт. и спектр. – 2009. – Т. 106. – №4. – С. 670–679.
4. Украинский А.О. Дисс. ... канд. физ.-матем. наук, СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург (2003).
5. Розанов Н.Н. Отражение сверхкоротких импульсов от границы среды Друде–Лоренца // Опт. и спектр. – 2003. – Т. 94. – № 3. – С. 449–452.
6. Ястребова Н.В., Шполянский Ю.А., Козлов С.А. Нелинейное отражение импульсов из малого числа колебаний светового поля от просветленной границы раздела сред // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 6. – С. 78–83.
7. Мохнатова О.А., Козлов С.А. Нелинейное отражение фемтосекундного лазерного суперконтинуума. // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 13. – В. 2. – С. 260–270.
8. Мохнатова О.А., Берковский А.Н., Козлов С.А. Нелинейное параксиальное отражение от диэлектриков импульсов из малого числа колебаний светового поля // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – В. 34. – С. 8–13.

- Мохнатова Ольга Александровна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, o.mokhnatova@mail.ru
- Козлов Сергей Аркадьевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, декан, kozlov@mail.ifmo.ru
- Беспалов Виктор Георгиевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, victorbepaloff@gmail.com
- Путилин Сергей Эдуардович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, seputilin@yandex.ru

УДК.621.396.988.6: 629.19

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ
БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Ю.Ф. Есин, П.П. Парамонов, Ю.И. Сабо

Рассматривается информационно-модельный подход к разработке системы контроля бортовых навигационных комплексов. Представлена функциональная схема контроля и результаты моделирования.

Ключевые слова: контроль состояния оборудования, моделирование.

Введение

В целях повышения надежности бортового оборудования и обеспечения безопасности полета в навигационных комплексах (НК) используются системы контроля. Система контроля – совокупность аппаратных и программных средств и методов, обеспечивающих выполнение следующих задач:

- определение состояния устройства или НК в целом (исправно–неисправно) по таким критериям, как контрольные значения, признак готовности по анализу слов-состояний при обмене с бортовой вычислительной машиной;
- определение характера ошибки (случайная или систематическая) и устранение последствий случайных ошибок (при несоответствии в конкретный момент времени значений параметров на входах и выходах блока обработки и преобразования заданному значению допуска делаются выводы о неработоспособности устройства);
- локализация неисправностей (диагностика) с заданной точностью (производится по оценке ответного слова, поступающего от бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО)).

Функциями НК являются обеспечение точности самолетовождения на маршруте и в зоне аэродрома, информационное обеспечение ручного, автоматизированного или автоматического управления самолетом. В состав НК входят следующие устройства: датчики первичной информации, бортовые вычислительные устройства, системы отображения пилотажно-навигационной информации, органы управления (пульты управления и индикации). Навигационная информация (в виде последовательного кода (ПК), аналоговых сигналов, разовых команд) с датчиков через блоки преобразования сигналов поступает в бортовые вычислительные машины, где происходит обработка полученной информации. Система контроля отслеживает правильность передачи информации и работоспособность элементов и комплекса в целом.

Задача разработки схемы контроля БРЭО

Системы контроля подразделяются на встроенные системы контроля и системы контроля комплекса в целом. В свою очередь, встроенные системы контроля можно разделить на наземные средства контроля, которые включают в себя аппаратные тесты встроенного контроля (ТВК) и тест наземного контроля блока, а также средства полетного контроля, предназначенные для контроля работоспособности БРЭО в полете. Также системы контроля можно классифицировать по целевому назначению (контроль работоспособности, диагностический, прогнозирующий), по степени автоматизации (автоматический, автоматизированный, ручной), по временным характеристикам (периодический, непрерывный), полноте контроля (полный, частичный); различают программный и аппаратный контроль и др.

Навигационный комплекс может функционировать только в том случае, когда создается возможность непрерывно получать информацию о его техническом состоянии. Получение такой информации с помощью одного универсального метода невозможно из-за большого разнообразия элементов НК и их функционального назначения. Процесс разработки НК всегда сопровождается поиском наиболее подходящих методов контроля технического состояния системы и ее частей. Выбор вида контроля, а также его метода зависит от особенностей контролируемого объекта и требований, предъявляемых к его характеристикам. При проектировании системы контроля необходимо проводить либо расчет, либо моделирование надежности изделия с учетом влияния контроля и на основании такого расчета выбирать оптимальную стратегию контроля.

Контроль и диагностика оказывают существенное влияние на показатели надежности объекта:

- а) контроль в совокупности с восстановлением работоспособности и исправлением обнаруженных ошибок обеспечивает нормальное функционирование объекта в заданной конфигурации и в заданных режимах, позволяет определить степень готовности объекта к включению, время переключения на резерв,

необходимость формирования резервных направлений передачи данных, новой конфигурации системы и т.п. Без средств контроля и диагностики невозможно нормальное функционирование системы;
 б) контроль и восстановление повышают показатели безотказности объекта. Одним из показателей качества контроля служит время, затрачиваемое на восстановление работоспособности объекта, а оно существенно влияет на коэффициент готовности объекта;
 в) контроль повышает достоверность информации при ее хранении, обработке и пересылке.

К недостаткам использования систем контроля в НК можно отнести тот факт, что ошибки в результате контроля могут привести к снижению достоверности информации. В пилотажно-навигационных комплексах ошибочные входные данные и аномальные значения сигналов должны отфильтровываться до того, как они смогут отрицательно повлиять на точность вычисления навигационного параметра. Это реализуется контролем путем использования избыточной информации и ее обработки по специальным алгоритмам. Уровень фильтрации данных в таком оборудовании должен соответствовать требованиям воздушного пространства и обеспечивать максимально возможное количество проверок правильности данных для защиты фильтров и выходных параметров.

Вышеизложенное подтверждает актуальность и практическую значимость исследований по разработке систем контроля НК, а, следовательно, и моделей функционирования элементов комплекса, совершенствованию методов их моделирования и реализации алгоритмов комплексной обработки информации.

Описание схемы контроля

Одной из функций, выполняемых НК, является отображение на МФЦИ информации о состоянии и основных параметрах функционирования общесамолетного оборудования (ОСО). При выполнении этой функции в составе бортового оборудования обеспечивается:

- непрерывный автоматический контроль собственной исправности НК;
- автоматизированный (по команде оператора) наземный контроль работоспособности взаимодействующих систем ОСО при предполетной подготовке и техническом обслуживании;
- непрерывный автоматический контроль состояния ОСО в полете.

На рис. 1 приведена структурная схема моделирования НК.

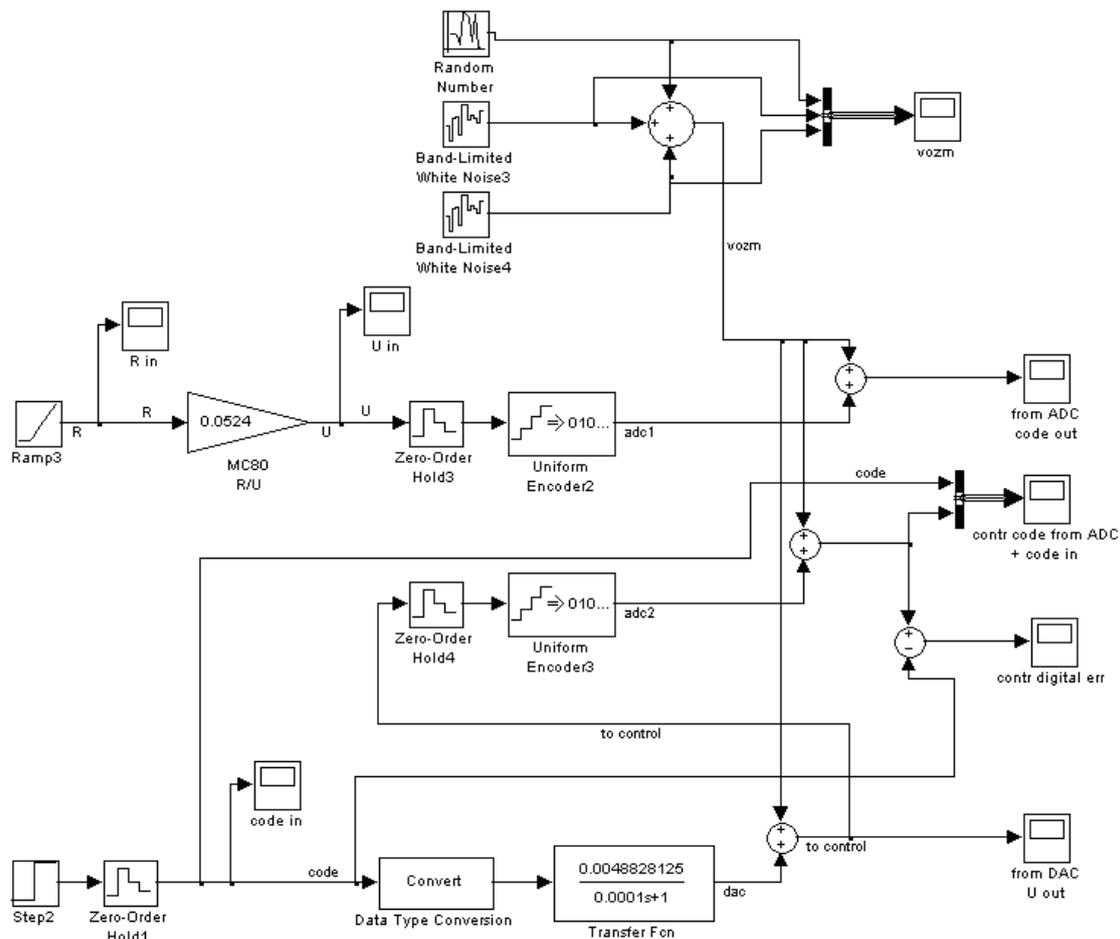


Рис. 1. Структурная схема моделирования системы контроля

- Схема моделирования отображает:
- преобразование изменения сопротивления 0–180 Ом в постоянное напряжение 0–9,4312 В в модуле МС80;
 - преобразование постоянного напряжения ± 10 В в код АЦП на примере одного канала;
 - преобразование разовых команд и последовательного кода в напряжение в ЦАП на примере одного канала;
 - контроль работы ЦАП, который реализуется с помощью контрольного канала: выход ЦАП замыкается на вход АЦП, полученный код сравнивается с входным кодом ЦАП, если ошибка превышает допустимое значение, в модуле процессора формируется сигнал ОТКАЗ.

Возмущающее воздействие представлено тремя составляющими: квазипостоянной, низкочастотной и быстроменяющейся, которые приведены к выходу модели. Время преобразования входного сигнала – не менее 160 мс, погрешность преобразования – не более 1% (0,1 В или 20 бит). На рис. 2 приведены результаты моделирования одного канала АЦП.

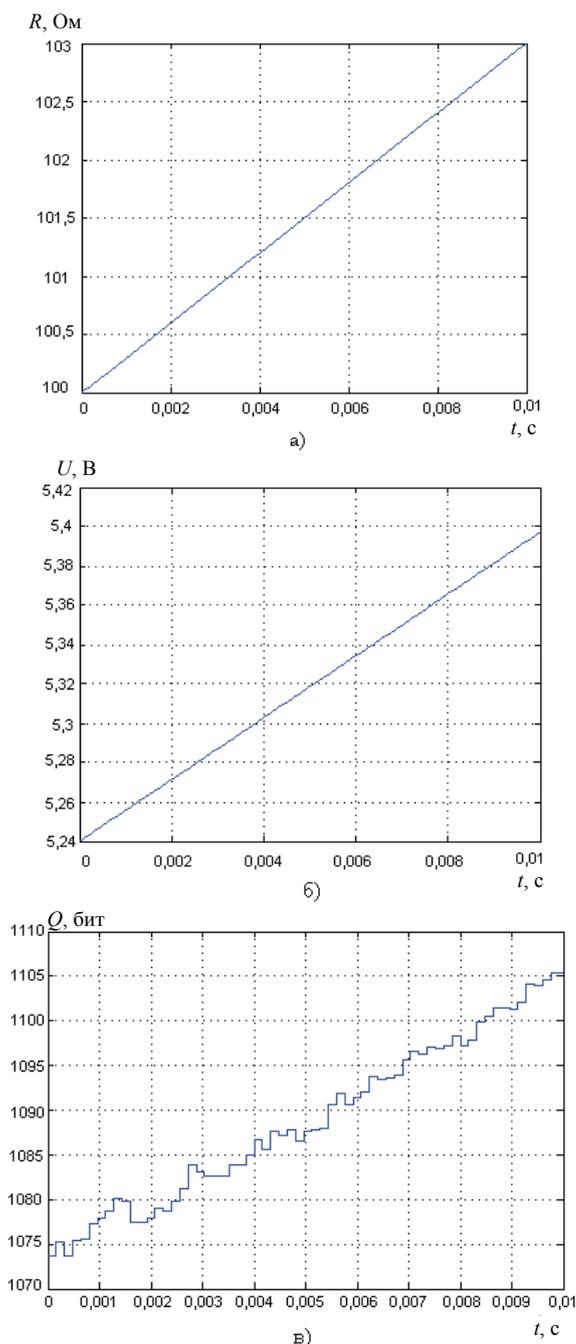


Рис. 2. Результаты моделирования канала АЦП: а) входное сопротивление, б) входное постоянное напряжение, в) выходной код АЦП в десятичной форме

Заключение

Представленные графики получены в системах моделирования LabView, MatLab, внедренных в технологический процесс проектирования и отработки навигационных комплексов летательных аппаратов на предприятии ФГУП «СПб ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова». Результаты моделирования показывают, что предлагаемый подход позволяет осуществлять контроль состояния исправности бортового оборудования и точности преобразования на уровне, задаваемом по техническому заданию на разработку изделия.

Литература

1. Григорьев В.В., Парамонов П.П., Козис Д.В., Коровьяков А.Н., Видин Б.В. Контроль показателей информационной надежности при моделировании аналоговых датчиков навигационных систем летательных аппаратов // Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 6. – С. 35–38.
2. Григорьев В.В., Козис Д.В., Коровьяков А.Н., Медынский Ю.В., Парамонов П.П. Обеспечение информационного подобия модели и реальной системы в навигационных комплексах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – Вып. 33. – С. 8–10.
3. Козис Д.В. Анализ подходов к моделированию пилотажно-навигационных комплексов летательных аппаратов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – Вып. 14. – С. 96–99.

- Есин Юрий Федорович* – ФГУП «СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П.А. Ефимова», кандидат технических наук, профессор, зам. главного конструктора, postmaster@elavt.spb.ru
- Парамонов Павел Павлович* – ФГУП «СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П.А. Ефимова», доктор технических наук, профессор, директор, postmaster@elavt.spb.ru
- Сабо Юрий Иванович* – ФГУП «СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П.А. Ефимова», доктор технических наук, профессор, главный конструктор, postmaster@elavt.spb.ru

УДК. 621.396.988.6: 629.19

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ
БОРТОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Д.В. Козис, О.О. Жаринов, В.Д. Суслов

Рассматривается подход к организации моделирования погрешностей бортовых навигационных систем на основе применения рекурсивных формирующих фильтров, преобразующих определенным образом белый шум в помеху с заданными корреляционно-спектральными свойствами.

Ключевые слова: окрашенный шум, формирующий фильтр.

Введение

Анализ входящих в бортовой навигационный комплекс (НК) устройств показывает, что основное влияние на статистические характеристики их выходных сигналов и на динамические погрешности результатов измерений оказывают следящие системы измерителей этих устройств [1, 2]. Следовательно, имитатор НК должен включать в себя либо реальный измеритель, либо его динамическую математическую модель. Для имитации работы НК на вход измерителя или его модели подается аддитивная смесь полезного сигнала и помехи.

В соответствии с общепринятой классификацией погрешностей, помеха на входе измерителя (динамической модели) НК должна иметь три составляющие: квазипостоянную, низкочастотную и высокочастотную. В силу независимости механизмов, лежащих в основе возникновения каждой из этих составляющих, их формирование в НК также может осуществляться независимо. Таким образом, ставится задача разработки математической модели и алгоритмов моделирования для описания моделей погрешностей, возникающих в бортовых измерителях НК.

Предлагаемый подход к моделированию погрешностей НК

Для имитации погрешностей НК необходимо знать статистические характеристики составляющих помехи на входе измерителя для различных режимов полета и работы НК. Эти данные получают на основании результатов обработки данных летных испытаний. В случае отсутствия необходимой информации требуемые статистические характеристики определяются приближенно посредством лабораторных испытаний имитируемых систем и устройств или берутся из технических описаний НК. Для моделирования квазипостоянной погрешности НК ограничиваются заданием постоянного смещения уровня сигнала на входе измерителя (модели) НК. Величина смещения может оставаться неизменной на протяже-

нии имитации полета. Однако для каждого сеанса имитации она должна выбираться из массива случайных чисел с соответствующим законом распределения. Низкочастотные флуктуации на входе модели, вызывающие появление медленно меняющейся погрешности, обычно аппроксимируются функциями специального вида (экспоненциально-косинусной или экспоненциальной).

Как указывалось выше, требования к точности имитации погрешности НК, а, следовательно, и помехи на входе устройства (или его динамической модели), достаточно высоки. В то же время операционные возможности моделирующей ЭВМ имитируемого НК вынуждают искать наиболее экономичные способы имитации погрешностей. При математическом моделировании этим требованиям наилучшим образом удовлетворяют цифровые рекурсивные фильтры [3, 4]. Исходя из этого, корреляционную функцию низкочастотной флуктуации удобно представить в следующем виде:

$$K(n) = \sigma^2 e^{-\gamma^* n} \cos(\gamma_0^* n),$$

где $\gamma^* = w^* \Delta t$; Δt – шаг дискретности; σ^2 – дисперсия моделируемой погрешности. Как известно, фильтр, формирующий из дискретного шума $\chi(n)$ с единичной дисперсией случайную флуктуацию $\xi(n)$ с такой корреляционной функцией, описывается дискретной передаточной функцией:

$$W(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}},$$

где коэффициенты

$$a_0 = \sigma l^*; a_1 = \frac{\sigma l_0^*}{l}; b_1 = 2\rho \cos(\gamma_0^*);$$

$$b_2 = -\rho^2; \rho = e^{-\gamma^*}; l_0^* = \rho(\rho^2 - 1) \cos(\gamma_0^*); l^* = \sqrt{l_1^*} \pm \frac{\sqrt{(l_1^*)^2 - 4(l_0^*)^2}}{2}; l_1^* = 1 - \rho^4.$$

Соответствующий рекуррентный алгоритм (разностное уравнение) имеет вид

$$\xi(n) = a_0 \chi(n) + a_1 \chi(n-1) + b_1 \xi(n-1) + b_2 \xi(n-2).$$

В простейшем случае, при экспоненциальной корреляционной функции, рекуррентное выражение может быть записано как

$$\xi(n) = a_0 \chi(n) + b_1 \xi(n-1),$$

где $a_0 = \sigma \sqrt{1 - \rho^2}$; $b_1 = \rho$. Сформированная таким образом низкочастотная составляющая флуктуации подается на вход измерителя НК или его динамической модели.

Быстро меняющаяся погрешность на выходе НК обусловлена действием широкополосной помехи на входе измерителя. Ввиду того, что эффективная полоса пропускания НК значительно уже ширины спектра входной помехи, последнюю целесообразно моделировать как белый шум (эквивалент). Роль формирующего фильтра при этом будет выполнять измеритель либо его модель.

В результате совместной подачи на вход измерителя (модели) идеального значения сигнала и всех составляющих помехи на выходе НК (или его модели) при маневрировании «объекта» будут присутствовать как случайная, так и детерминированная составляющие совокупной погрешности НК. При математическом моделировании динамическую модель измерителя удобно реализовывать в виде рекурсивного фильтра. В этом случае на каждом шаге вычислений в рекуррентные уравнения динамической модели подставляется сумма:

- текущего значения навигационного параметра;
- смещения, имитирующего квазипостоянную помеху;
- случайного числа, представляющего мгновенное значение низкочастотной флуктуации;
- случайного числа из генератора дискретного белого шума.

Вычисленная оценка навигационного параметра на выходе модели преобразуется в физический сигнал и подается на входы потребителей.

Специфическим требованием, предъявляемым к динамическим моделям навигационных измерителей, является необходимость учета нелинейного характера дискриминационной характеристики следящей системы и нестационарности погрешности, связанной с переменной величиной отношения сигнал/помеха. Влияние значения этого отношения на точность измерения удобно имитировать соответствующим изменением коэффициентов передачи рекурсивных фильтров, формирующих погрешности на входе измерителя. Управление фильтрами в соответствии с переменной навигационной обстановкой осуществляется на основании зависимостей, определяемых далее.

При имитации работы сравнительно простых НК, где режим комплексной обработки информации отсутствует, имеет смысл воспроизводить погрешности измерителей по выходу, ввиду простоты реализации такого моделирования. Для формирования погрешностей целесообразно использовать рекурсивные фильтры. В качестве примера рассмотрим случай моделирования по выходу погрешностей дальномерно-угломерной системы. На рис. 1 приведена схема формирования выходных сигналов измерителей такой системы. Для формирования высокочастотных ($\Delta A_{\text{в}}, \Delta D_{\text{в}}$) и низкочастотных ($\Delta A_{\text{н}}, \Delta D_{\text{н}}$) флуктуа-

ционных погрешностей измерителя используются формирующие фильтры $W_H^A(Z)$, $W_B^A(Z)$, $W_H^D(Z)$, $W_B^D(Z)$, аналогичные описанным ранее.

В каждом цикле вычисления дальности D и азимута A фильтры возбуждаются генератором нормального белого шума. Поскольку осуществляется последовательный опрос генератора, числа, поступающие на входы фильтров, независимы, а, следовательно, независимы все моделируемые погрешности. Сформированные погрешности складываются между собой и с идеальными значениями азимута A_0 и дальности D_0 соответственно. Сигналы A_0 и D_0 поступают из алгоритма вычисления азимута и дальности, реализуемого в моделирующей ЭВМ НК. Полученные таким способом реальные сигналы азимута A и дальности D поступают на входы навигационного вычислителя или его модели и через преобразователи код-угол $(N - \alpha)$ – на реальные потребители. Флуктуационные погрешности ΔA , ΔD оператор будет воспринимать как дополнительные колебания стрелок индикаторов.

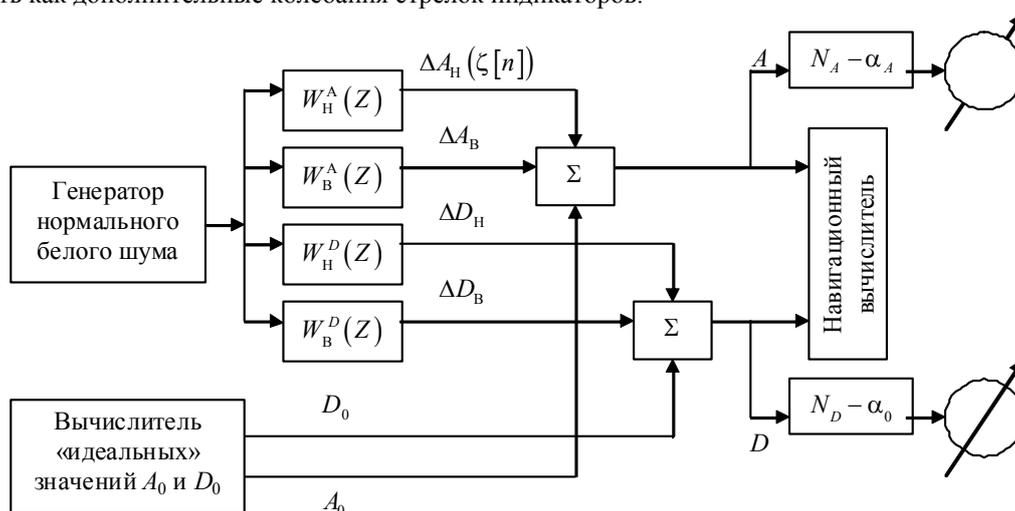


Рис. 1. Схема формирования выходных сигналов измерителей системы моделирования погрешности по выходу

Заключение

В соответствии с принятым способом имитации в процессе моделирования не учитываются нелинейности дискриминаторов и динамические ошибки результатов измерений. Для более строгого описания характеристик помехи необходимо также рассмотреть способ имитации погрешностей угломерно-дальномерной системы, где в основу генерации положен принцип моделирования динамических уравнений возмущенной работы измерителей системы.

Литература

1. Григорьев В.В., Парамонов П.П., Козис Д.В. и др. Контроль показателей информационной надежности при моделировании аналоговых датчиков навигационных систем летательных аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. – 2006. – № 6. – Т. 49. – С. 35–38.
2. Козис Д.В. Анализ подходов к моделированию пилотажно-навигационных комплексов летательных аппаратов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – Вып. 14. – С. 96–99.
3. Жаринов И.О. Программа моделирования на ЭВМ независимых дискретных числовых последовательностей с различными законами распределения. – М.: ВНИИЦ, 50200300625, 2003.
4. Жаринов И.О. Программа моделирования на ЭВМ нормально распределенных дискретных числовых последовательностей, заданных своими корреляционно-спектральными характеристиками. – М.: ВНИИЦ, 50200300624, 2003.

Козис Дмитрий Владимирович
Жаринов Олег Олегович

– РАА «Спецтехника», кандидат технических наук, директор, kozisd@mail.ru
– Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кандидат технических наук, доцент, zharinov@hotmail.ru
– ФГУП «СПб ОКБ “Электроавтоматика” имени П. А. Ефимова», зам. генерального директора, postmaster@elavt.spb.ru

Суслов Владимир Дмитриевич

УДК 629.7.05

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КРЕЙТА БОРТОВОЙ МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВИОНИКИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

О.О. Жаринов, Б.В. Видин, Р.А. Шек-Иовсепянц

Рассматриваются принципы построения бортовой цифровой вычислительной системы в классе структур интегрированной модульной авионики. Определены значимые архитектурные признаки вычислительных систем. Рассмотрены модель ресурсов вычислительной системы и трехступенчатая иерархическая веерная модель. Рассмотрен метод декомпозиции функциональных задач бортовой вычислительной системы и их назначение на доступные вычислительные ресурсы.

Ключевые слова: принципы построения, бортовая вычислительная система, крейт.

Введение

Авиационные комплексы, находящиеся сегодня в эксплуатации, имеют системно-ориентированную детерминированную структурную организацию. Вычислительный ресурс этих комплексов регулярно распределен между информационными каналами связи посредством организации отдельных подсистем (перераспределение задач между подсистемами на системном уровне не предусматривается), что не обеспечивает достаточной и гибкой интеграции бортового оборудования. Реализуется лишь резервирование наиболее важных функций, решаемых средствами бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС). Кроме того, невозможна полномасштабная адекватная адаптация функциональных ресурсов БЦВС к различным ситуационным изменениям внешней обстановки. При этом возможность программного управления потоками информации (программная коммутация) в архитектурах современных БЦВС не реализуется вообще.

Для радикального повышения эффективности функционирования БЦВС разработчиками сегодня предпринимаются попытки ее реализации и проектирования в классе мультимикропроцессорных структур интегрированной модульной авионики (ИМА) с программируемой архитектурой, допускающей динамическое перераспределение вычислительной мощности аппаратуры в зависимости от приоритета решаемых задач. В связи с этим оказывается актуальной задача разработки такой вычислительной системы, организованной по типу интегрированной вычислительной среды, в которой изначально отсутствует регулярное распределение средств вычислительной техники по функциональным подсистемам и информационным каналам связи.

Иерархическая трехступенчатая веерная модель БЦВС

Открытая архитектура интегрированной модульной авионики строится по иерархическому принципу [1]:

- нижний уровень иерархии образуют унифицированные быстросъемные функциональные модули различного назначения, имеющие собственные вычислительные средства в компактном стандартном исполнении (европлаты с типоразмерами 3U, 6U, 9U);
- средний уровень иерархии образуют мультипроцессорные вычислительные системы, создаваемые из модулей нижнего уровня и конструктивно интегрированные в стандартный крейт;
- высший уровень иерархии представляет собой бортовую локальную вычислительную сеть, интегрирующую вычислительные средства боксов среднего уровня, на основе центрального сетевого интерфейса высокой пропускной способности.

В иерархической структуре ИМА заложен принцип присвоения более высокого ранга тем подсистемам управления и информационного обеспечения летательного аппарата (ЛА), которые в большей степени способствуют повышению эффективности использования ЛА в целом. Согласно принятой терминологии [2], схема иерархической организации БЦВС по концепции ИМА относится к классу трехступенчатых веерных структур, определяющих систему, в которой существует один привилегированный субъект (центр), который имеет возможность управлять остальными субъектами – посредниками П. Целевая функция центра Ц имеет вид $\Pi = \Pi(r_{x_1}, r_{x_2}, \dots, r_{x_k}; r_{y_1}, r_{y_2}, \dots, r_{y_k})$, где $\{r_{x_1}, r_{x_2}, \dots, r_{x_k}\}$ – ресурс управления, который находится в распоряжении центра Ц (воздействие центра на посредников $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_k$). Целевые функции посредников Π_i имеют вид $\Pi_i = \Pi_i(r_{y_{i1}}, r_{y_{i2}}, \dots, r_{y_{ie}}; r_{z_{i1}}, r_{z_{i2}}, \dots, r_{z_{ie}})$, $i=1, 2, \dots, k$, где $\{r_{y_{ij}}\}$ – это управление Π_i , его воздействие на исполнителей I_{ij} (исполнителя номер j , подчиненного по уровню иерархии посреднику Π_i).

Таким образом, интересы посредников определяются ресурсом $\{r_{y_{i1}}, r_{y_{i2}}, \dots, r_{y_{iz}}\}$, который находится в их собственном распоряжении, и ресурсом $\{r_{x_1}, r_{x_2}, \dots, r_{x_k}\}$, которым распоряжается центр.

Иерархия представляет собой свойство упорядоченного множества компонентов, между которыми установлено отношение приоритета. Компоненты комплекса, между которыми отсутствует предпочтительность, образуют один иерархический уровень. Приоритет субъектов проявляется в том, что центр назначает правила использования ресурса $\{r_{x_1}, r_{x_2}, \dots, r_{x_k}\}$, который зависит тем или иным образом от действий посредников, от их выбора $\{r_{y_{i1}}, r_{y_{i2}}, \dots, r_{y_{iz}}\}$. Посредникам эти правила становятся известными в тот момент, когда они принимают решения об использовании $\{r_{y_{i1}}, r_{y_{i2}}, \dots, r_{y_{iz}}\}$, тем самым центр в иерархической системе имеет возможность (правило первого хода) направлять в нужное русло усилия элементов низшего иерархического уровня, что создает предпосылки для организации реконфигурируемых вычислительных структур.

Целевые функции исполнителей $I_{ij} = I_{ij}(r_{y_{ij}}; r_{z_j})$, $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, z_i$, где величины $\{r_{z_j}\}$ характеризуют действия исполнителей. Первый ход в трехступенчатой иерархической структуре делает центр – он сообщает посредникам правила назначения ресурсов $\{r_{x_1}, r_{x_2}, \dots, r_{x_k}\}$ в зависимости от их выбора. Следующий ход производит посредник, который сообщает правила выбора $\{r_{y_{i1}}, r_{y_{i2}}, \dots, r_{y_{iz}}\}$.

Модель вычислительных ресурсов БЦВС

У каждого типа ресурса r_i существует набор функций $f = \{f_1^i, f_2^i, \dots, f_{j^i}^i\}$, которые он способен выполнять на множестве заданий $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_z\}$. Выполнение одного задания Z_i требует выполнения набора функций $\tilde{f}^\ell = \{\tilde{f}_1^\ell, \tilde{f}_2^\ell, \dots, \tilde{f}_{j^\ell}^\ell\}$. При этом [3]:

- ресурс $r_i \in R$ считается способным к работе над заданием $Z_i \in Z$, $i=1, 2, \dots, z$, если существует функция $f: f \in f^i$ и $f \in \tilde{f}^j$;
- ресурс $r_i \in R$ считается способным к работе над набором заданий $\bar{Z}_i \in Z$, $i=1, 2, \dots, 2^z$, если $\forall Z_{j_k} \in \bar{Z}_i$, где \bar{Z} – множество всех подмножеств заданий Z ;
- совокупность ресурсов $r_i \in R$ считается способной к работе над заданием $Z_i \in Z$, $i=1, 2, \dots, z$, если $\forall r_i \in \bar{R}$, где \bar{R} – множество всех подмножеств ресурсов R ;
- совокупность ресурсов $r_i \in R$ считается способной к работе над набором $\bar{Z}_i \in Z$, $i=1, 2, \dots, 2^z$, если $\forall Z_{j_k} \in \bar{Z}_i, \exists r_k \in \bar{r}_i$, способный к работе над Z_{j_k} .

Распределением заданий считается назначение совокупности $r_i \in R$ для каждого задания $Z_i \in Z$, пригодной к работе над ними, с условием, что никакие два $r_i \neq r_j$ не выполняют одну и ту же функцию f одного и того же задания Z .

Принципы построения аппаратных средств БЦВС

Детализация ИМА-структуры крейта вычислительной системы БЦВС показана на рис. 1 [4]. Приняты следующие обозначения: БР – буферный регистр, ЛОП – локальная оперативная память, ПДП – узел прямого доступа к памяти. Обмен данными между вычислителями MB_i , $i=1, 2, \dots, n$, осуществляется через системный интерфейс СИ и общий модуль памяти МП. Физическую основу реализации БЦВС ИМА-структуры (см. рис. 2) составляют модули-вычислители типа МВ80, модули памяти МП80, разработанные в ФГУП «СПб ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова» и выполненные по стандарту 6U на базе отечественного микропроцессорного комплекта «Мультиборт», который отвечает требованиям стандарта высокоскоростных коммуникаций системного интерфейса SpaceWire ECSS-E-50-12A, внедренного и поддерживаемого ESA (European Space Agency), NASA (США), JAXA (Япония), CSA (Канада) и Российским космическим агентством.

Идея реализации задач комплекса на вычислителях класса MB_1, MB_2, \dots, MB_n заключается в следующем. Каждый из MB_i , $i=1, 2, \dots, n$, функционирует по своей циклограмме, задаваемой препроцессором форматирования. Препроцессор форматирования ПФ $_i$, $i=1, 2, \dots, n$, распознает данные из общего

потока к абонентам или от абонентов, предназначенные для обработки на соответствующем вычислителе $МВ_i, i=1, 2, \dots, n$. В каждом из вычислителей $МВ_i, i=1, 2, \dots, n$, помимо препроцессора форматирования, имеются вычислительный узел ВУ, блок памяти БП и, в случае децентрализованного управления обменом с системным интерфейсом СИ, процессор обмена ПО. От соответствующего препроцессора форматирования в блок обмена БО поступают данные согласно принятому на борту ЛА протоколу взаимодействия. Согласно системе классификации Флинна, такая БЦВС относится к классу многопроцессорных систем с множественным потоком команд и множественным потоком данных (MIMD).

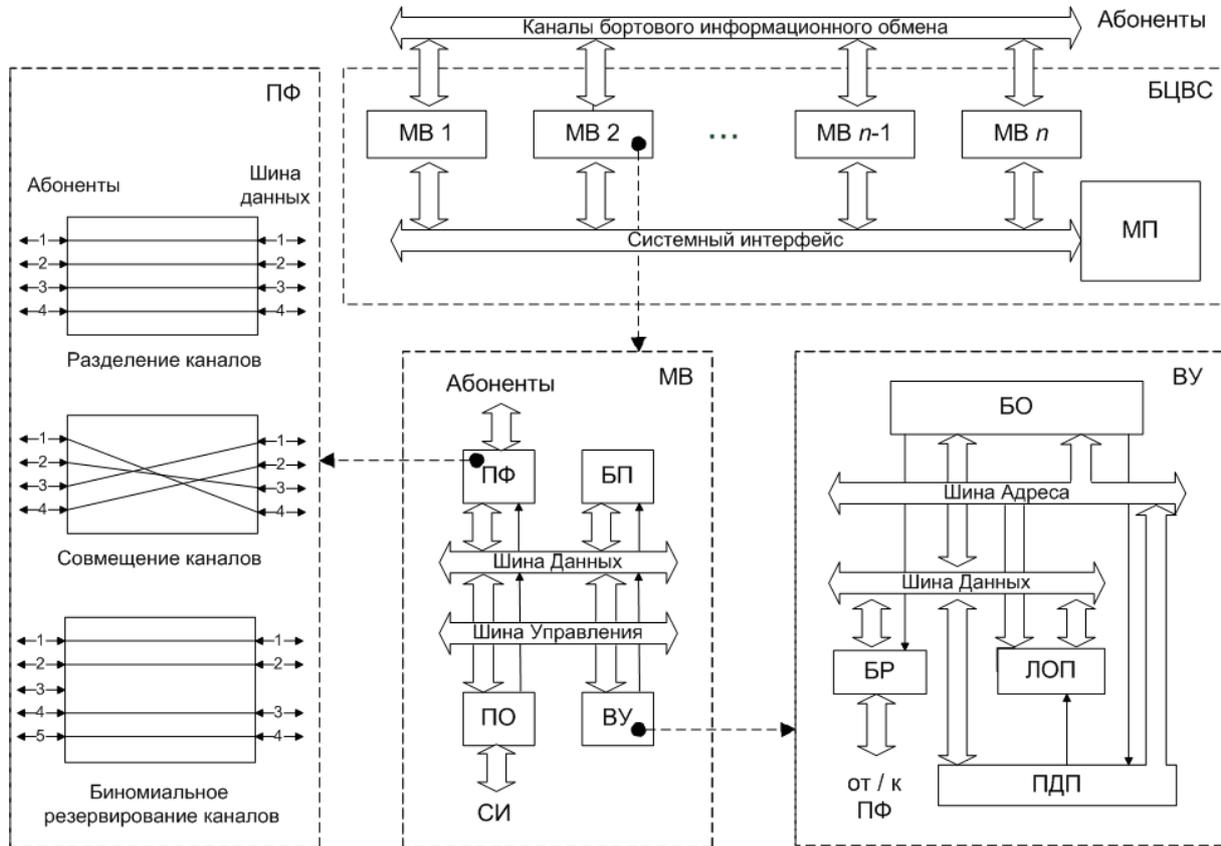


Рис.1. Обобщенная структура многопроцессорной вычислительной системы

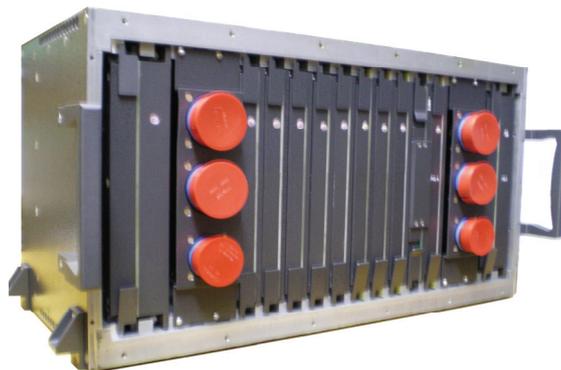


Рис. 2. Прототип бортовой цифровой вычислительной платформы „Крейт-6U“, разработанной в ФГУП «СПб ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова»

В архитектуре БЦВС структуры ИМА средствами модулей $МВ_i, i=1, 2, \dots, n$ предусматриваются три типа препроцессорной обработки [4]:

- форматирование с разделением каналов, когда ПФ устанавливает биективное соответствие между каналами связи с абонентами комплекса и каналами шины данных вычислителей $МВ_i, i=1, 2, \dots, n$;
- совмещение каналов, когда соответствия между каналами обменов и каналами шины данных вычислителей $МВ_i, i=1, 2, \dots, n$ являются произвольными (каждый с каждым, т.е. реализуется свойство отказоустойчивости – БЦВС остается работоспособной при наличии хотя бы одного исправного ресурса каждого типа);

– форматирование данных в условиях биномиального резервирования каналов обмена (при этом препроцессор форматирования устанавливает соответствие между каналами абонентов комплекса и каналами шины данных вычислителя $MB_i, i=1, 2, \dots, n$ с учетом введенной аппаратурной избыточности, обусловленной резервированием).

В соответствии с принятыми [4] способами препроцессорной обработки вычислители $MB_i, i=1, 2, \dots, n$ реализуют функции:

- препроцессорной обработки Θ средствами препроцессора форматирования ПФ;
- промежуточного хранения данных Ω (буферизацию), осуществляемого блоком памяти БП;
- обмена I с системным интерфейсом СИ с помощью процессора ПО или вычислительного узла ВУ;
- обработки P на вычислительном узле;
- управления U обменом. При централизованном управлении обменом функция U реализуется ВУ, а процессор обмена ПО отсутствует.

Соответствующие этим функциям архитектурные признаки БЦВС структуры ИМА являются наиболее значимыми и имеют вид $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$, где θ_1 – разделение, θ_2 – совместное использование, θ_3 – биномиальное резервирование каналов обмена; $\Omega = \{\omega_1, \omega_2\}$, где ω_1 – наличие, ω_2 – отсутствие буферизации данных; $I = \{i_1, i_2\}$, где i_1 – пословный обмен, i_2 – обмен блоками слов в системном интерфейсе; $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$, где p_1 – обработка слов сразу после форматирования, p_2, p_3 – обработка перед буферизацией и после считывания данных из буфера обмена (блока памяти) соответственно, p_4 – обработка до и после буферизации; $U = \{u_1, u_2\}$, где u_1 и u_2 обозначают соответственно централизованное и децентрализованное управление.

Правила синтеза описаний $\Lambda = \{\Theta_{j_1}, \Omega_{j_2}, I_{j_3}, P_{j_4}, U_{j_5}\}$ формируются на основе известных знаний [4] о предметной области (назначения БЦВС) и исходя из допустимых принципов сочетаний вычислительных ресурсов в заданном наборе архитектурных признаков. Подмножество разрешенных частных описаний вычислителей $MB_i, i=1, 2, \dots, n$ и их композиции в составе БЦВС определяется набором допустимых сочетаний $\Lambda_1 = \{\theta_1, \omega_1, i_1, p_1, u_1\}$; $\Lambda_2 = \{\theta_j, \omega_1, i_1, p_2, u_1\}$, $j = 1, 2, 3$; $\Lambda_3 = \{\theta_j, \omega_1, i_1, p_3, u_1\}$, $j = 1, 2, 3$; $\Lambda_4 = \{\theta_j, \omega_1, i_1, p_4, u_1\}$, $j = 1, 2, 3$; $\Lambda_5 = \{\theta_j, \omega_1, i_2, p_1, u_1\}$, $j = 1, 2, 3$; $\Lambda_6 = \{\theta_j, \omega_1, i_2, p_3, u_2\}$, $j = 1, 2, 3$; $\Lambda_7 = \{\theta_j, \omega_1, i_2, p_4, u_2\}$, $j = 1, 2, 3$; $\Lambda_8 = \{\theta_j, \omega_2, i_1, p_1, u_1\}$, $j = 2, 3$. Сами по себе правила формирования описаний не формализуют конструктивного приема порождения вариантов (проектных альтернатив) архитектуры БЦВС. Эти правила лишь допускают либо запрещают определенные комбинации архитектурных признаков базиса модулей $MB_i, i=1, 2, \dots, n$. Сама же процедура синтеза связана с отображением операционной модели БЦВС на ее целевую структуру.

Отображение операционной модели БЦВС на доступные вычислительные ресурсы

Сущность метода отображения операционной модели на доступные вычислительные ресурсы заключается в следующем [5]. Пусть имеется n информационно связанных задач, которые необходимо решать с помощью крейта ИМА, и соответствующие задачам алгоритмы. Каждый алгоритм может быть представлен как некоторая последовательность функциональных операторов.

Граф, соответствующий результирующему вычислительному алгоритму, образуется следующим образом. Каждому, например, i -му функциональному оператору Φ_i алгоритма ставится в соответствие вершина графа v_i , возле которой записывается ее вес – время выполнения данного функционального оператора в относительных единицах. Вершины v_i и v_j соединяются линией со стрелкой (дугой графа), направленной в v_i только в том случае, если результат, полученный после выполнения v_j , является одним из аргументов для v_i . Всякая дуга выражает либо вычислительную зависимость между соответствующими функциональными операторами, либо требования порядка выполнения соединяемых вершин, либо то и другое. Совокупность графов n задач составляют метаграф G_{BC} процесса решения n задач всей вычислительной системы. Так как рассматриваемые задачи информационно связаны, то и граф G_{BC} является связным. Проектирование модели крейта ИМА состоит в выборе числа вычислителей (модулей-вычислителей MB) и в определении электрических (логических) связей между ними в соответствии с графом G_{BC} , ограничениями (время, надежность и т.д.) и некоторым функционалом оптимальности.

Назовем вершины графа G_{BC} , в которые входят дуги исходных данных, начальные, а вершины, из которых выходят дуги результата решения задач или фрагментов вычисления, – конечными (так, на рис. 3 вершины v_1, v_5, v_9 являются начальными, а вершины v_6, v_7, v_{11} – конечными). Назовем также подграф G_{BCi} графа G_{BC} независимым, если ни в одну его вершину не входит дуга другого подграфа. Нетрудно видеть, что для организации вычислительного процесса необходимо разложить граф G_{BC} на независимые подграфы G_{BCi} . Действительно, для независимого подграфа не нужны промежуточные результаты опера-

торов, не входящих в этот подграф, и, следовательно, каждый из них можно реализовать на отдельном МВ, обменивающимся информацией по «медленному» интерфейсу. Очевидно, число задействованных вычислителей МВ будет зависеть от числа независимых подграфов. Поскольку все вычислители будут работать параллельно, время выполнения всех n задач t_p при такой структуре будет минимальным, т.е. дальнейшее увеличение числа процессоров не уменьшит t_p .

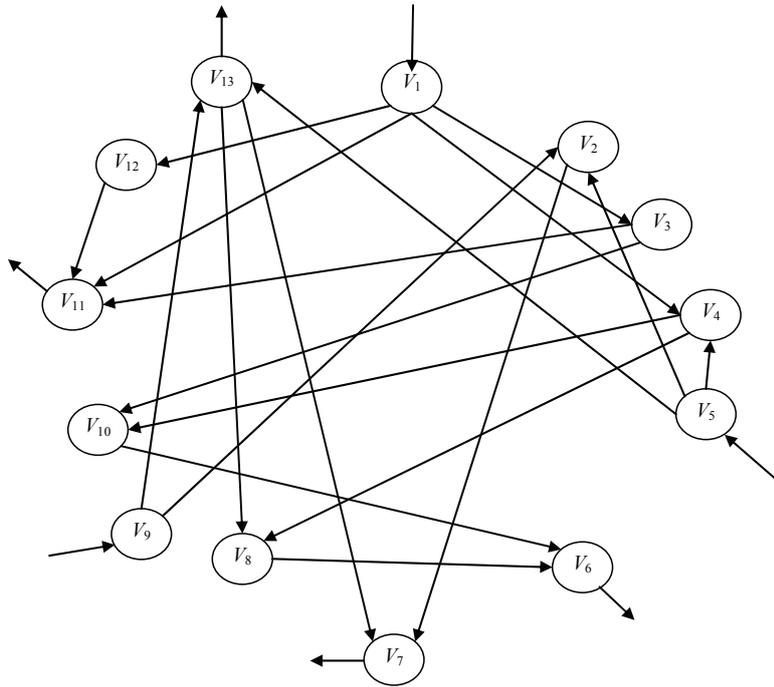


Рис. 3. Операционная модель G_{BC} вычислительной системы в виде многосвязного графа операций обмена и обработки информации

Рассмотрим основные положения, на которых строится алгоритм декомпозиции графа на независимые подграфы. Если существует множество вершин $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}$, из которых дуги выходят и входят в вершину v_i , то это множество принадлежит независимым подграфам, в которые входит вершина v_i . В то же время вершина v_i будет входить в независимые подграфы, строящиеся на базе вершин, в которые входят дуги, выходящие из вершины v_i .

Определим матрицу размерностью $m \times m$ (m – число вершин графа), у которой элемент на пересечении i -й строки и j -го столбца равен 1, если имеется дуга, направленная от i -й вершины к j -й вершине. Если дуга имеет противоположное направление, соответствующий элемент равен -1 . При отсутствии такой дуги рассматриваемый элемент определяется как 0.

На первом этапе алгоритма рассматриваются строки матрицы графа G_{BC} с целью выявления строки, имеющей только отрицательные единицы (тем самым определяется конечная вершина). Номер вершины данной строки будет составлять первый элемент образуемого массива E .

На втором этапе по полученной строке определяются столбцы, которые имеют на пересечении с ней отрицательные элементы. Тем самым выявляются вершины, входящие в независимый подграф найденной конечной вершины. Номера этих вершин вводятся в массив E .

На третьем этапе просматриваются элементы найденных выше столбцов, и отрицательные из них обнуляются. Этим исключается возможность последующего просмотра уже найденных вершин при наличии в графе контуров. Далее повторяются манипуляции второго этапа со строками, соответствующими указанным выше столбцам, и т.д. После того как исчерпаны все строки, имеющие отрицательные элементы, массив E , образованный в результате реализации алгоритма, выводится на печать. Этот массив дает перечисление всех вершин, входящих в первый независимый подграф.

На четвертом этапе происходит подготовка к реализации следующего цикла алгоритма. С этой целью стертые ранее отрицательные элементы восстанавливаются, а полученные на первом этапе строки и соответствующие им столбцы обнуляются. Далее процедура повторяется (начиная с первого этапа).

Алгоритм прекратит реализацию, после того как все строки, имеющие только отрицательные элементы, будут исчерпаны. Если каждый независимый i -й подграф реализуется на отдельном МВ за время t_{pi} , то $t_p = \max\{t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pN}\}$. Если имеются ограничения вида $\sum_{j=1}^l t_{pj} \leq t_p$, тогда l подграфов, которым

принадлежит суммарное время решения, могут быть реализованы последовательно на одном бортовом вычислителе, при этом общее время t_p решения n задач не увеличится. Конструктивная реализация многомашиной вычислительной системы дает оптимум по критерию минимума числа вычислителей МВ, задействованных в составе крейта БЦВС ИМА.

Применение алгоритма функционального разделения графа, показанного на рис. 3, позволяет получить три его независимых подграфа (см. рис. 4), каждый из которых соответствует своему алгоритму, исполняемому на отдельном МВ.

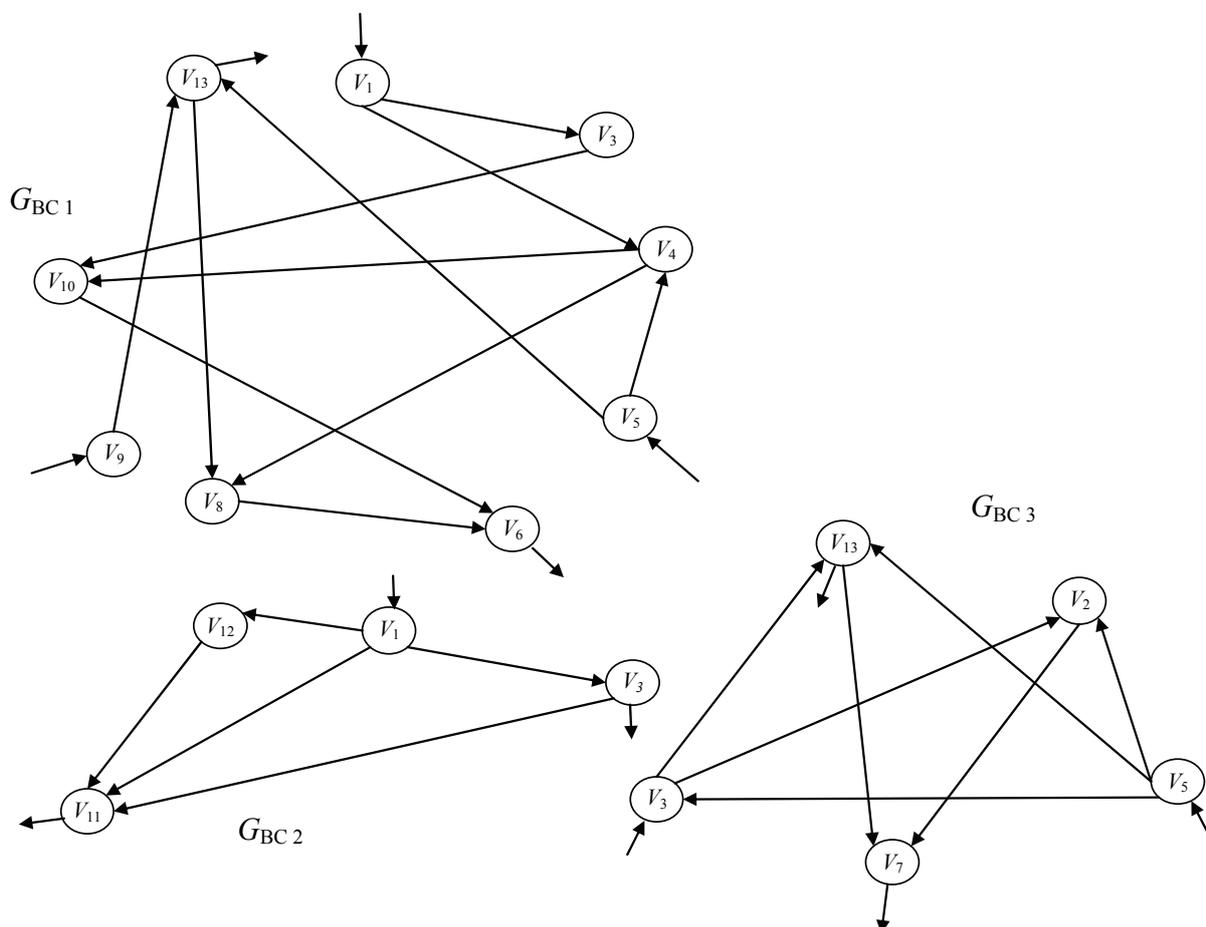


Рис. 4. Независимые подграфы $G_{BC 1}$, $G_{BC 2}$, $G_{BC 3}$ многосвязного графа G_{BC}

Заключение

В согласии с результатами работы [4] можно сделать вывод, что наиболее экономичным и предпочтительным по реализации мультипроцессорной БЦВС в условиях компромисса в пространстве состояний ($|HW|$, $|SW|$, T), где $|HW|$ – затраты на реализацию аппаратной платформы модулей МВ, $|SW|$ – сложность программного кода, T – ограничение на время выполнения бортовой задачи в вычислительной системе соответствующей архитектуры Λ_i , является вариант многопроцессорной системы «Крейт-6U» (см. рис. 2) с архитектурными признаками $\Lambda_3 = \{\theta_1, \omega_1, i_1, p_3, u_1\}$ – вычислители типа МВ80, модуль памяти МП80, разработанные в ФГУП «СПб ОКБ „Электроавтоматика“ им. П.А. Ефимова» в рамках реализации концепции ИМА бортовой авионики.

Рассмотренные в работе принципы построения БЦВС в соответствии с основными положениями концепции ИМА и методика оценки сложности вычислительного алгоритма БЦВС были применены также к анализу комплектов документации бортовых комплексов (систем) К-130, СОИ-У-25-1, СОИ-У-25-2, ССИ-80. Расчеты показывают, что внедрение структур ИМА на базе унифицированных конструктивно-функциональных модулей стандарта 6U с крейтово-модульным конструктивом БЦВС для решения бортовых задач указанных комплексов (систем) приводит к экономии материальных средств аппаратного обеспечения от 19% до 48%.

Литература

1. Павлов А.М. Принцип организации бортовых вычислительных систем перспективных летательных аппаратов // Мир компьютерной автоматизации. – 2001. – № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.mka.ru/?p=41177, открытый.
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.
3. Ивченко В. Д., Корнеев А. А. Анализ методов распределения заданий в задачах управления коллективом роботов // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2009. – № 7. – С. 36–42.
4. Топорков В. В. Модели распределенных вычислений. – М.: ФизМатЛит, 2004. – 320 с.
5. Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О. Организация вычислительного процесса в многома-шинном бортовом вычислительном комплексе // Известия вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 6. – С. 41–50.

Жаринов Олег Олегович

– Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кандидат технических наук, доцент, zharinov@hotmail.ru

Видин Борис Викторович

– ФГУП «СПб ОКБ “Электроавтоматика” имени П. А. Ефимова», кандидат технических наук, зам. главного конструктора, postmaster@elavt.spb.ru

Шек-Иовсепянц Рубен Ашотович

– ФГУП «СПб ОКБ “Электроавтоматика” имени П. А. Ефимова», доктор технических наук, профессор, главный конструктор, postmaster@elavt.spb.ru

УДК 621.397.331+517.968

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СМАЗАННЫХ ПОД УГЛОМ И ЗАШУМЛЕННЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ УЧЕТА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

М.В. Дайнеко, В.С. Сизиков

Рассматривается задача реконструкции смазанных под углом и зашумленных изображений методом квадратур с регуляризацией Тихонова. При восстановлении смазанных изображений применяется новый подход – прием усечения и размытия краев, не учитывающий «граничные условия».

Ключевые слова: смазанные под углом изображения, реконструкция изображений, метод регуляризации Тихонова, граничные условия.

Введение

Реконструкция искаженных (смазанных и зашумленных) изображений является актуальной задачей в области цифровой обработки изображений. Данная некорректная задача описывается обычно набором одномерных интегральных уравнений (ИУ) Фредгольма I рода типа свертки [1–13]

$$(1/\Delta) \int_x^{x+\Delta} w_y(\xi) d\xi = g_y(x) + \delta g, \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x-\xi)w_y(\xi)d\xi = g_y(x) + \delta g \quad (2)$$

или двумерным ИУ Фредгольма I рода типа свертки

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x-\xi, y-\eta)w(\xi, \eta)d\xi d\eta = g(x, y) + \delta g. \quad (3)$$

Здесь Δ – величина смаза, h – функция рассеяния точки (ФРТ, PSF), обычно пространственно-инвариантная, w и g – распределение интенсивности по неискаженному и искаженному изображениям соответственно, δg – помеха. В (1), (2) ось x направлена вдоль смаза, а y играет роль параметра. Интегральные уравнения (1) и (2) обычно используются в задаче смазывания, а (3) – в задаче дефокусирования, но часто ([3] и др.) уравнение (3) используется для решения обеих задач.

Цель данной работы – восстановление (реконструкция) смазанных под углом и зашумленных изображений без использования так называемых «граничных условий», но с введением приемов усечения, размытия краев и поворота изображения в рамках системы программирования MatLab7. При этом предлагается использовать методы преобразования Фурье (ПФ) и квадратур с регуляризацией Тихонова как в прямой (моделировании смаза), так и в обратной задаче (реконструкции).

Данная работа является продолжением работ [2, 9, 10, 13].

Граничные условия

Во многих зарубежных работах ([3, 5–8, 11] и др.) при решении прямой задачи смазывания изображения используются для учета интенсивностей вне границ изображения так называемые «граничные условия» (boundary conditions, BCs). Например, в m -функции `imfilter` системы MatLab7 при формировании смазанного или размытого изображения в качестве параметра можно задавать различные «граничные условия»: `zero`, `circular`, `symmetric` и др.

В дискретном виде задачу формирования смазанных или размытых изображений можно представить выражением

$$g = Aw + \delta g, \quad (4)$$

где g – матрица смазанного изображения, A – матрица, связанная с ФРТ и «граничными условиями», w – матрица неискаженного изображения размера $m \times n$, δg – помеха.

Однако введение «граничных условий», когда функция w не является финитной, приводит к усложнению матрицы A [6]. Например, при использовании нулевых граничных условий матрица A представляет собой блок теплицевых матриц, а при рефлексивных (`symmetric`) – сумму блоков теплицевых и ганкелевых матриц [6]. Правильнее было бы говорить не о «граничных условиях», а о внеграничных условиях, точнее, об экстраполяции значений интенсивности w за границы изображения. Для решения модельной задачи – формирования смазанного изображения – был предложен [10] прием усечения и размы-

тия краев изображения для случая горизонтального смазывания. В данной работе этот прием распространяется на случай смазывания изображения под произвольным углом.

Смазывание изображения под углом

Моделирование смазанного под углом изображения уже реализовано в рамках системы программирования MatLab7 при помощи m -функций `fspecial` и `imfilter`. Функция `fspecial` задает разностную функцию рассеяния точки (ФРТ) $h(x, y)$. Однако алгоритм, используемый в функции `fspecial.m` для решения прямой задачи, реализован достаточно сложным образом – путем отбора ближайших пикселей, расположенных вдоль наклонной под некоторым углом θ прямой линии на расстоянии не более 1 пикселя. При этом используется билинейная интерполяция. Кроме того, получение смазанного изображения $g(x, y)$ в функции `imfilter.m` реализовано с использованием «граничных условий», а также путем свертки истинного изображения $w(x, y)$ с заданной в виде матрицы ФРТ $h(x, y)$:

$$g(x, y) = \iint_D h(x - \xi, y - \eta) w(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad x, y \in D, \quad (5)$$

где D – видимая область изображения.

В данной работе предлагается использовать другой подход – прием поворота изображения, который реализован при помощи m -функции `imrotate.m` [11]. На рис. 1 приведена схема смазывания изображения под произвольным углом с размытием краев изображения и с использованием его поворота.

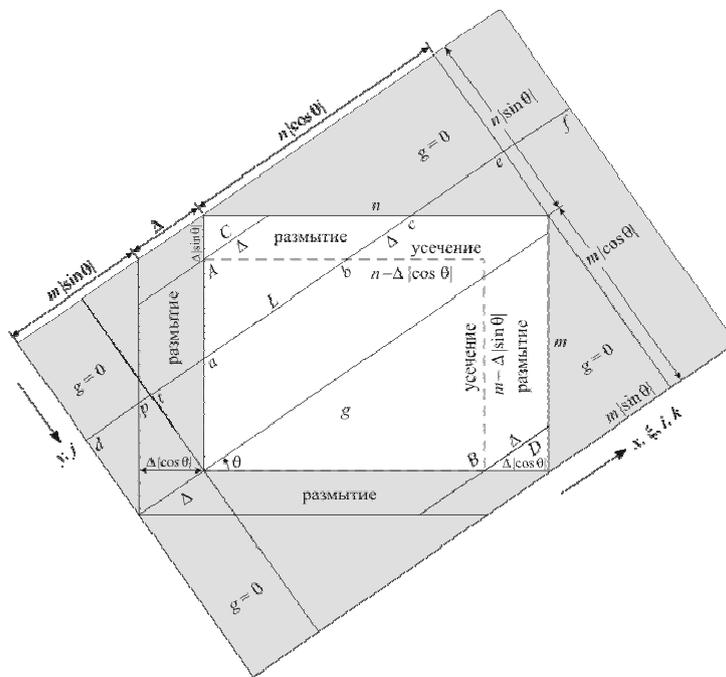


Рис. 1. Моделирование смазывания изображения под углом по схеме с размытыми краями

Заметим, что в случае использования функций MatLab'a `fspecial.m` и `imfilter.m` задача смазывания изображения рассматривается как двумерная (см. выражение (3)). В данной работе прямая задача сводится к решению набора одномерных уравнений (выражения (1), (2)).

На рис. 2 представлены два варианта смазанного под углом $\theta = 35^\circ$ текстового изображения размером 618×690 пикселей, величина смаза $\Delta = 20$ пикселей; на рис. 2, а – изображение, смазанное при помощи функций `fspecial` и `imfilter` («граничное условие» `circular`); на рис. 2, б – изображение, смазанное при использовании приема размытия краев и приема поворота изображения.

При решении обратной задачи (реконструкция смазанных под углом и зашумленных изображений) для решения набора одномерных ИУ (2) был применен метод квадратур с регуляризацией Тихонова. Кроме того, после реконструкции был выполнен обратный поворот и полученное изображение приводилось к фактическому размеру.

Уравнение (2) в виде системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) можно представить в виде

$$Aw = g, \quad (6)$$

где A – матрица СЛАУ. Ввиду использования приема размытия краев при решении прямой задачи выражение (6) является переопределенной СЛАУ [10]. Решение СЛАУ (6) методом квадратур с регуляризацией Тихонова имеет вид [5, 7, 10, 13]

$$w_{\alpha} = (\alpha I + A^T A)^{-1} A^T g, \quad (7)$$

где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, I – единичная матрица, A^T – транспонированная матрица.

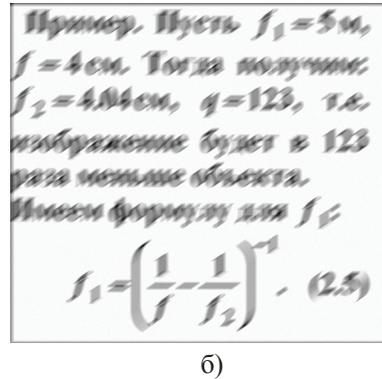
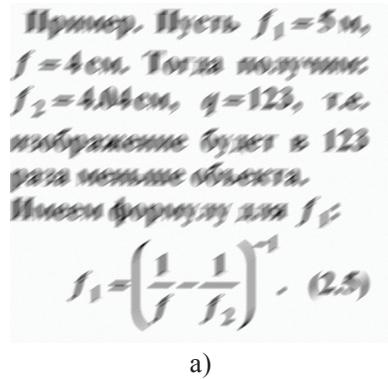


Рис. 2. Реконструкция смазанных и зашумленных изображений

В данной работе, применительно к обратной задаче, было произведено сравнение метода квадратур (и регуляризации Тихонова) с методом преобразования Фурье (ПФ) (и регуляризации Тихонова) [9, 10, 13, 15], а также с методом параметрической фильтрации Винера. Метод параметрической фильтрации Винера реализован в MatLab7 при помощи m-функции `deconvwnr` [11, с. 184] и дополнен использованием «граничных условий».

На рис. 3 представлен результат реконструкции смазанного под углом $\theta = 35^\circ$ и зашумленного 1%-ным гауссовым шумом ($\| \delta g \| / \| g \| = 0,01 = 1\%$) изображения методом квадратур и регуляризации Тихонова (рис. 3, б), методом ПФ и регуляризации Тихонова (рис. 3, в) и методом параметрической фильтрации Винера (рис. 3, г). Величина смаза Δ во всех случаях составляла 20 пикселей. Исходное изображение размером 618×690 пикселей приведено на рис. 3, а.

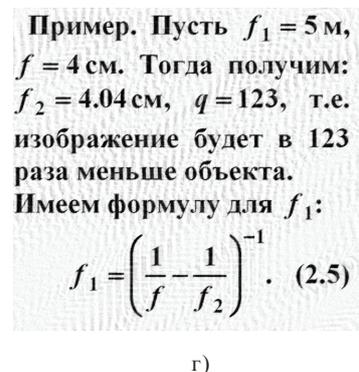
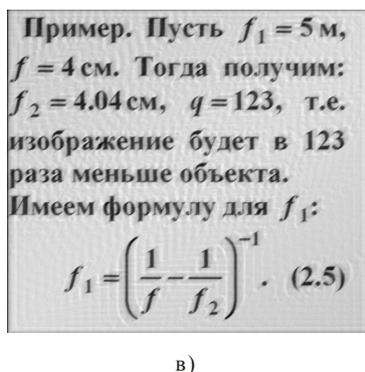
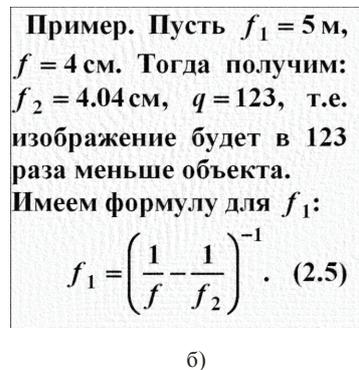
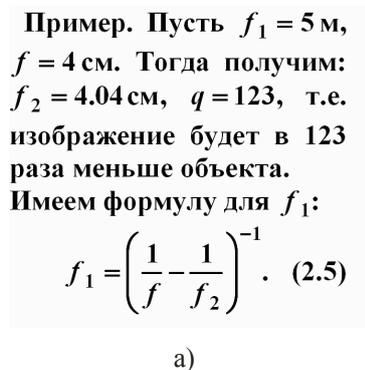


Рис. 3. Реконструированные изображения с последующей фильтрацией ($\theta=35^\circ$, $\Delta = 20$, уровень шума 1 %)

При решении обратной задачи выбор параметра регуляризации α определялся путем визуальной оценки полученных результатов и путем минимизации относительного среднеквадратического отклонения (СКО) восстановленного изображения от исходного [14]:

$$\sigma_{\text{rel}} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [(w_{\alpha})_{ji} - \bar{w}_{ji}]^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \bar{w}_{ji}^2}} \quad (10)$$

(величину σ_{rel} можно вычислить лишь в модельной задаче, когда \bar{w} известно). На основании экспериментальных данных реконструкции были построены кривые зависимости величины СКО σ_{rel} от параметра регуляризации α , а также зависимость СКО от константы (параметра) K , определяющей соотношение шум/сигнал по мощности в методе параметрической фильтрации Винера [3, с. 392; 11]. На рис. 4 показаны данные зависимости: кривая 1 – в случае использования метода ПФ и регуляризации Тихонова; кривая 2 – при методе квадратур и регуляризации Тихонова; кривая 3 – при обращении к методу параметрической фильтрации Винера. Отметим, что оптимальное значение параметра регуляризации α_{opt} и параметра K_{opt} в случае решения модельных задач соответствует минимуму значения СКО $\sigma_{\text{rel}}(\alpha)$ и $\sigma_{\text{rel}}(K)$.

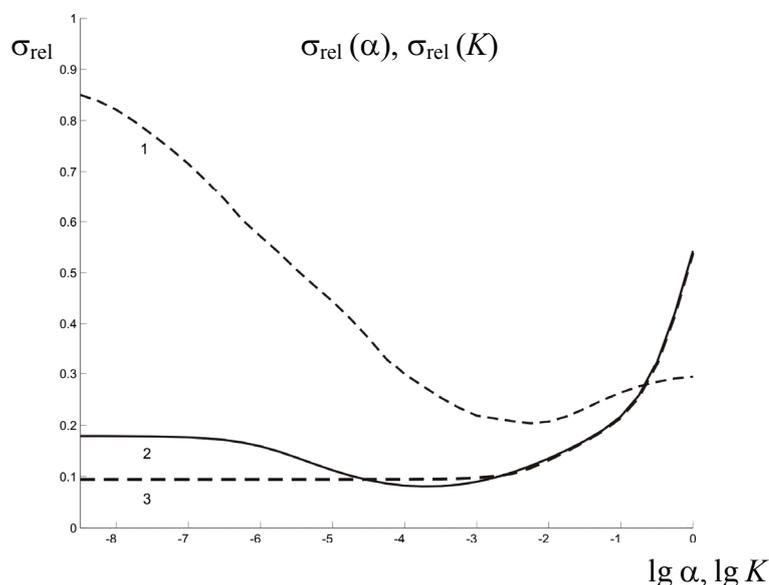


Рис. 4. Зависимость СКО от параметра регуляризации α при фильтрации шума после реконструкции

В рамках системы программирования MatLab7 при решении прямой и обратной задач были разработаны собственные m -функции: `smearing.m` – прямая задача моделирования смазывания изображения (в том числе для цветных изображений); `normnoise.m` – добавление нормального (гауссова) шума; `rmsd.m` – оценка относительного среднеквадратического отклонения (relative mean square deviation); `desmearingf.m` – обратная задача реконструкции смазанного изображения методом ПФ и регуляризации Тихонова; `desmearingq.m` – обратная задача реконструкции методом квадратур и регуляризации Тихонова.

Устранение зашумленности изображений

При решении задачи устранения шума также использовались методы параметрической фильтрации Винера, метод квадратур и ПФ с регуляризацией Тихонова. Для решения обратной задачи и сравнения вышеуказанных методов было предложено три способа восстановления: без фильтрации шума, с предварительной фильтрацией и с фильтрацией после реконструкции. Для подавления аддитивного гауссова 1%-го шума, как показали эксперименты, лучше всего использовать метод адаптивной винеровской фильтрации (реализация в MatLab7 при помощи m -функции `wiener2`). Численная оценка полученных результатов реконструкции при различных вышеуказанных способах представлена в таблице.

Вид реконструкции	Метод ПФ с регуляризацией Тихонова		Метод квадратур с регуляризацией Тихонова		Метод параметрической фильтрации Винера	
	α_{opt}	$\sigma_{rel}(\alpha_{opt})$	α_{opt}	$\sigma_{rel}(\alpha_{opt})$	K_{opt}	$\sigma_{rel}(K_{opt})$
без фильтрации шума	$10^{-2,25}$	0,2006	$10^{-2,85}$	0,1051	10^{-5}	0,0999
с предварительной фильтрацией	$10^{-2,45}$	0,1991	$10^{-3,5}$	0,0980	10^{-5}	0,1110
с последующей фильтрацией	$10^{-2,25}$	0,2086	$10^{-3,6}$	0,0806	10^{-5}	0,0945

Таблица. Относительная погрешность восстановления смазанных и зашумленных изображений

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что метод квадратур с регуляризацией Тихонова позволяет наиболее точно и качественно восстанавливать искаженные изображения (смазанные под углом и зашумленные). Метод параметрической фильтрации Винера и метод ПФ с регуляризацией Тихонова уступают методу квадратур с регуляризацией Тихонова. Кроме того, в работе предложен новый способ моделирования смазанных под углом изображений без использования «граничных условий».

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-08-00034).

Литература

1. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В. Обратные задачи обработки фотоизображений // Некорректные задачи естествознания / Под ред. А.Н. Тихонова, А.В. Гончарского. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – С. 185–195.
2. Сизиков В.С., Белов И.А. Реконструкция смазанных и дефокусированных изображений методом регуляризации // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67. – № 4. – С. 60–63.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
4. Воскобойников Ю.Е., Литасов В.А. Устойчивый алгоритм восстановления изображения при неточно заданной аппаратной функции // Автометрия. – 2006. – Т. 42. – № 6. – С. 3–15.
5. Christiansen M., Hanke M. Deblurring methods using antireflective boundary conditions. – 2006 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu>, свободный.
6. Palmer K., Nagy J., Perrone L. Iterative methods for image restoration: Matlab object oriented approach. – 2002 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://citeseer.ist.psu.edu>, свободный.
7. Donatelli M., Estatico C., Martinelli A., Serra-Capizzano S. Improved image deblurring with anti-reflective boundary conditions and re-blurring // Inverse problems. – 2006. – V. 22. – P. 2035–2053.
8. Arico A., Donatelli M., Nagy J., Serra-Capizzano S. The anti-reflective transform and regularization by filtering. – 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <ftp://ftp.mathcs.emory.edu>, свободный.
9. Римских М.В., Евсеев В.О., Сизиков В.С. Реконструкция смазанных изображений различными методами // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 11. – С. 53–57.
10. Сизиков В.С., Римских М.В., Мирджамолов Р.К. Реконструкция смазанных и зашумленных изображений без использования граничных условий // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 5. – С. 38–46.
11. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
12. Бакушинский А.Б., Гончарский А.В. Некорректные задачи. Численные методы и приложения. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 199 с.
13. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений. – СПб.: Политехника, 2001. – 240 с.
14. Пикалов В.В., Непомнящий А.В. Итерационный алгоритм с вейвлет-фильтрацией в задаче двумерной томографии // Вычислит. методы и программирование. – 2003. – Т. 4. – С. 244–253.
15. Ягола А.Г., Кошев Н.А. Восстановление смазанных и дефокусированных цветных изображений // Вычислительные методы и программирование. – 2008. – Т. 9. – С. 207–212.

Дайнеко Мария Владимировна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, дайнеком@gmail.com

Сизиков Валерий Сергеевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, sizikov2000@mail.ru

УДК 681.587.73

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АЗИМУТАЛЬНОЙ ОСИ ТЕЛЕСКОПА ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А.Г. Ильина

Рассмотрена процедура параметрической идентификации безредукторного высокомоментного прецизионного электропривода опорно-поворотного устройства телескопа траекторных измерений, проводимая в целях синтеза параметров регуляторов его подчиненной САР. В результате проведенной идентификации вычислены параметры теоретической модели электропривода, позволившие в достаточной для решаемой задачи степени приблизить свойства математической модели к свойствам объекта управления.

Ключевые слова: прецизионный электропривод, параметрическая идентификация.

Введение

Синтез прецизионной системы управления телескопом траекторных измерений (ТТИ) невозможен без адекватной объекту математической модели моментного электропривода опорно-поворотного устройства (ОПУ). Развитие машинно-ориентированных методов проектирования систем автоматического регулирования (САР) позволяет использовать для получения таких моделей методы параметрической и непараметрической идентификаций.

Основными особенностями моментных электроприводов ОПУ ТТИ являются [1, 2]: широкий диапазон скоростей слежения при малых значениях среднеквадратичных ошибок наведения, инфранизкие скорости движения оптической оси ТТИ (единицы угловых секунд за секунду), использование уникальных прецизионных датчиков координат, жесткость конструкции осей ОПУ ТТИ и, как следствие, возникновение механического резонанса на частотах от единиц Гц. Поэтому в качестве электромеханических преобразователей в исполнительных осях ОПУ рассматриваемых ТТИ (рис. 1, а) с целью максимального упрощения кинематических передач выбираются встраиваемые в ОПУ высокомоментные синхронные машины с постоянными магнитами на роторе, используемые в режиме вентильного двигателя (ВД) [3, 4]. Эти машины отличаются малым энергопотреблением на инфранизких скоростях и большим отношением вращающего момента к моменту инерции ротора, определяющим предельное быстродействие машины. Термин «моментный» означает, что двигатели спроектированы специально для режима вращения с малой скоростью (строго говоря, для пускового режима), когда можно не учитывать все потери, связанные с быстрым вращением ротора.

В настоящей статье ставится задача получения адекватной математической модели моментного электропривода азимутальной оси совместно с его нагрузкой – ОПУ ТТИ, описывающей этот сложный механический объект управления в виде двух сосредоточенных масс, соединенных жесткой связью, т.е. системы, обладающей одним механическим резонансом.

Решение поставленной задачи обеспечивается посредством определения части коэффициентов уравнений модели с помощью параметрической идентификации. В век повсеместного внедрения информационных технологий сложнейший математический аппарат параметрической и непараметрической идентификации, превращенный Mathworks при сотрудничестве пионера современной идентификации и всемирно известного специалиста в области теории автоматического управления Л. Льюнга в доступный и удобный инструмент, не является более серьезным препятствием к ее практическому применению в задачах синтеза систем управления. Однако успешное применение параметрической идентификации требует задания априорных значений искомых параметров, для чего, учитывая сложность конструкции рассматриваемого объекта управления, целесообразно подвергнуть анализу 3-d модель конструкции (рис. 1, б) для нахождения значений параметров неэлектрической природы. 3-d модель может быть реализована в любой из множества сред разработки, таких как SolidWorks или AutoCAD, а анализ конструкции на частотные и другие свойства легко реализуется в пакетах типа ANSYS.

В статье представлена последовательность операций, проводимая с применением упомянутых пакетов и сред и позволяющая получить адекватную ОПУ ТТИ двухмассовую математическую модель.

Рассмотрим математическую модель вентильного двигателя (ВД), работающего на двухмассовую нагрузку с жесткой связью. Известно, что математическая модель ВД может быть без существенной потери информативности упрощена и представлена моделью двигателя постоянного тока (ДПТ) [1, 3]. Тогда система уравнений электропривода, работающего на нагрузку с жестким валом, будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = -\frac{i}{\beta} - c_e \Omega_1 + u; \\ J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} = c_m i - M_{c1} - M_{12} - M_{\text{каб.пер.}}; M_{\text{каб.пер.}} = K \cdot \alpha_1; \\ \frac{d\alpha_1}{dt} = \Omega_1; \\ \frac{db}{dt} = c_{12} (\Omega_1 - \Omega_2); M_{12} = b + m(\Omega_1 - \Omega_2); \\ J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} = M_{12} - M_{c2}; \\ \frac{d\alpha_2}{dt} = \Omega_2, \end{array} \right. \quad (1)$$

где L, R – индуктивность и сопротивление фазы ВД, i, u – ток в фазе ВД и напряжение, приложенное к фазе ВД, c_e – конструктивная постоянная по ЭДС, c_m – постоянная по моменту, Ω_1, Ω_2 – скорости вращения первой и второй массы, $M, M_{c1}, M_{c2}, M_{12}$ – электромагнитный момент двигателя, моменты сопротивления вращению первой и второй масс и момент, создаваемый нежесткой связью, $M_{\text{каб.пер.}}$ – момент возмущения, создаваемый кабельным переходом, связанный с углом поворота первой массы коэффициентом жесткости K , c_{12} – коэффициент жесткости упругой связи, m – коэффициент демпфирования, J_1, J_2 – приведенные к оси вращения моменты инерции первой и второй масс, α_1, α_2 – углы поворота первой и второй масс, z_p – число пар полюсов двигателя, $\beta = \frac{\cos(\arctg(z_p \Omega_1 T_f))}{\sqrt{R^2 + (z_p \Omega_1 R T_f)^2}} \leq \frac{1}{R}$ – коэффициент приведения

ВД к ДПТ (для моментных двигателей, работающих на инфранизких скоростях $\beta \approx \frac{1}{R}$) [3]. Параметры, требующие определения для приведения математической модели (1) к реальному объекту – $J_1, J_2, c_e, c_{12}, c_m, m$, тогда как известными можно считать подлежащие измерению R и T_f .

При проведении параметрической идентификации требуется определить примерные (так называемые начальные или априорные) значения искомым параметров, так как при большом количестве неизвестных возможно множество решений поставленной задачи, и полученная таким образом модель может оказаться недостоверной. Априорные значения параметров J_1, J_2 и c_{12} могут быть получены по 3-d модели (рис. 1, б, в) ОПУ ТТИ и его реальной частотной характеристике (рис. 2).

На рис. 1 представлены фотография опытного образца ОПУ ТТИ (а) и его 3-d модель (б–г), реализованная в SolidWorks.

САПР Solid Works позволяет провести расчет приведенных к азимутальной оси моментов инерции «сборок» (рис. 1, в, и 1, г) и, таким образом, установить приближенные значения моментов инерции J_1 и J_2 обеих сосредоточенных масс. Из выражения, определяющего резонансную частоту двухмассового механизма, $\omega_{0p} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} / \sqrt[4]{((J_1 + J_2) / J_1)^3}$ [6], и значения нижней частоты резонанса на экспериментальной АЧХ опытного образца ОПУ ТТИ (рис. 2) находим значение жесткости упругой связи c_{12} . Априорные значения c_e и c_m , связанные соотношением $c_m = 1,5c_e$ [3], можно грубо оценить как отношение выходного и входного сигналов ОПУ ТТИ в установившемся режиме работы, так как при жесткой связи ($c_{12} \rightarrow \infty$) обеих масс передаточная функция вентильного электропривода без учета влияния момента сопротивления кабельного перехода примет вид

$$W(p) = \frac{\Omega(p)}{u(p)} = \frac{1/c_e}{\frac{T_f J_s R}{c_e c_m} p^2 + \frac{J_s R}{c_e c_m} p + 1},$$

где $J_s = J_1 + J_2$ – суммарный момент инерции.

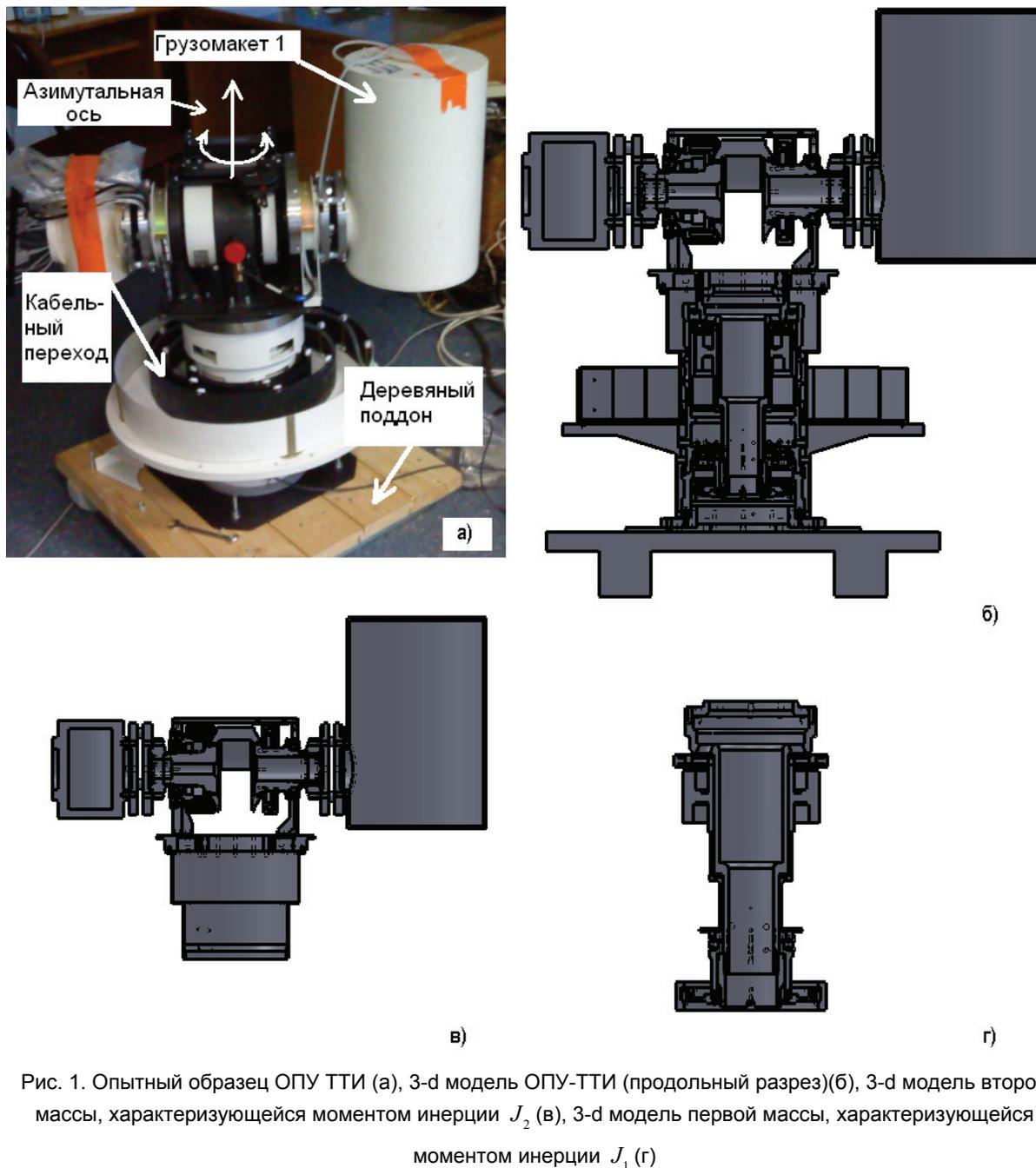


Рис. 1. Опытный образец ОПУ ТТИ (а), 3-d модель ОПУ-ТТИ (продольный разрез)(б), 3-d модель второй массы, характеризующейся моментом инерции J_2 (в), 3-d модель первой массы, характеризующейся моментом инерции J_1 (г)

Параметрическая идентификация ОПУ ТТИ проводится методом Estimating ODE parameters [5]. Этот метод может применяться для проведения параметрической идентификации в нашем случае, так как система дифференциальных уравнений, описывающих объект, известна. В качестве входного сигнала из ряда стандартных тестовых сигналов для решения поставленной задачи выбран меандр напряжения. При других стандартных тестовых сигналах (импульсная характеристика или белый шум в объекте) могут возникнуть колебания во всем частотном спектре, что, учитывая наше представление объекта двух-массовой моделью с одним резонансом, является некорректным. При использовании линейно нарастающего входного задания частотная характеристика будет искажена демпфирующим воздействием кабельного перехода.

Рассмотрим процесс идентификаций методом Estimating ODE parameters. Для проведения идентификации модель (1) следует представить в матричной записи (здесь $e(t)$ – белый шум):

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t), \\
 y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t), \\
 x(0) &= x_0.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

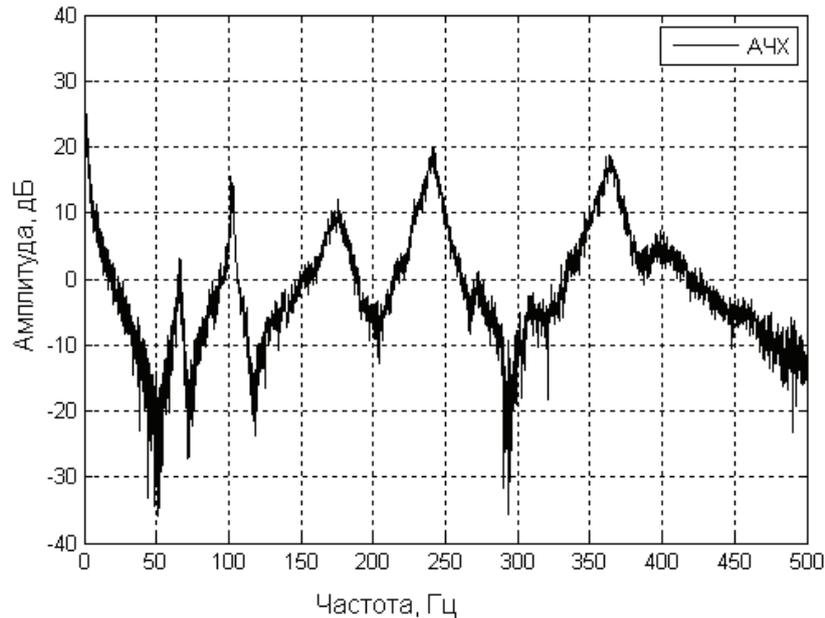


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика опытного образца ОПУ ТТИ (рис. 1, а)

Так как на рис. 3 наблюдается низкая зашумленность сигнала скорости, то влиянием шума измерений и шума объекта можно пренебречь. Матрицы исследуемой системы имеют следующий вид:

$$y = [i \quad \Omega_1 \quad \alpha_1 \quad \Omega_2 \quad \alpha_2]^T; \quad u = [U \quad b \quad \alpha_{1_отн} \quad b];$$

$$A = \begin{bmatrix} -1/T_f & -ce/L & 0 & 0 & 0 \\ cm/J_1 & -m/J_1 & -c12/J1 & m/J_1 & c12/J1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m/J_2 & c12/J2 & -m/J_2 & -c12/J2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Mc1/J_1 & -K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Mc2/J_1 \end{bmatrix};$$

$$C = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \quad K = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \quad D = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0];$$

$$x(0) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

Для вычисления значений параметров записанной в матричном виде системы уравнений в рабочей области Matlab задаются следующие команды:

$$\text{model} = \text{idgrey}('OPU', \text{parameter}, 'c', 0.001, 0); \text{model} = \text{pem}(\text{dannie}, \text{model}); \quad (3)$$

где "OPU" представляет собой функцию, задающую структуру модели:

```
function [A,B,C,D,K,x0] = OPU(par,T,CDmfile,aux)
A=[(-1/Tf), -par(1)/L, 0, 0, 0; 1.5*par(1)/par(2), -par(3)/par(2), -par(4)/par(2), par(3)/par(2), par(4)/par(2); 0, 1, 0, 0, 0; 0, par(3)/par(5), par(4)/par(5), -par(3)/par(5), -par(4)/par(5); 0, 0, 0, 1, 0];
B=[1/L 0 0 0; -par(6)/J1 -par(7) 0; 0 0 0 0; 0 0 0 -par(8)/J2];
C=[0, 1, 0, 0, 0];
D=[0 0 0 0];
K=zeros(5,1);
x0=[0; 0; 0; 0; 0];
```

"parameter" – файл, содержащий априорные значения искомым параметров; dannie=iddata(s,u,Td) – входные данные идентификации, сформированные из сигналов: s – массив данных скорости объекта, u – массив данных управляющего напряжения, Td – шаг измерений в секундах.

В результате выполнения команд (3) с учетом принятых допущений и при условии, что искомое решение существует, формируется модель заданной структуры с параметрами, близкими по значениям к указанным в файле `parameter.m`, и обладающая динамическими свойствами, сходными с реальным объектом. На рис. 3 представлены графики изменения угловой скорости при подаче входного меандра напряжения, полученные на опытном образце ОПУ ТТИ и при моделировании системы уравнений (1) где в качестве значений параметров используются полученные параметрической идентификацией методом `Estimating ODE parameters`.

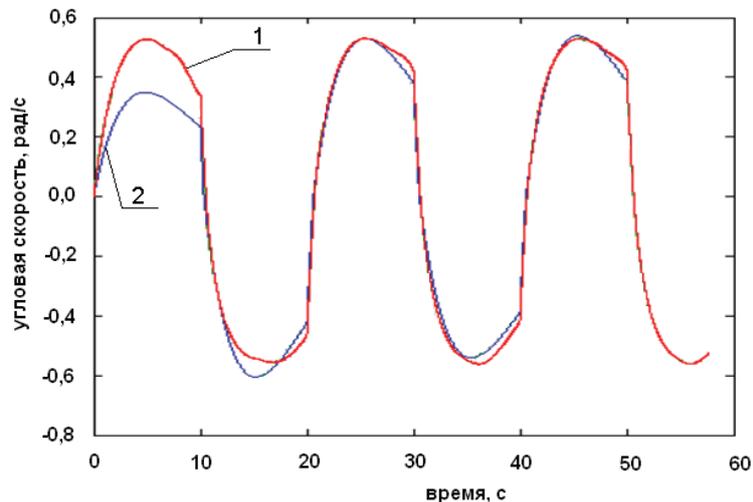


Рис. 3. Сигналы изменения скорости разомкнутого вентильного электропривода при реакции на входной сигнал управления типа меандр: 1 – опытный образец ОПУ ТТИ (рис. 1, а), 2 – найденная математическая модель

Как уже отмечалось, конечной целью получения адекватной математической модели объекта является синтез его системы управления. Продемонстрируем работу замкнутого контура скорости опытного образца ОПУ ТТИ (рис. 1, а), настроенного на технический оптимум (ТО), причем параметры ПИ регулятора контура рассчитаны на основании динамических свойств найденной с помощью идентификации модели. На рис. 4 представлены графики эталонной кривой отработки настроенной на ТО САР скорости входного ступенчатого воздействия и угловая скорость в САР скорости вращения оптической оси ОПУ ТТИ при реакции на тот же сигнал.

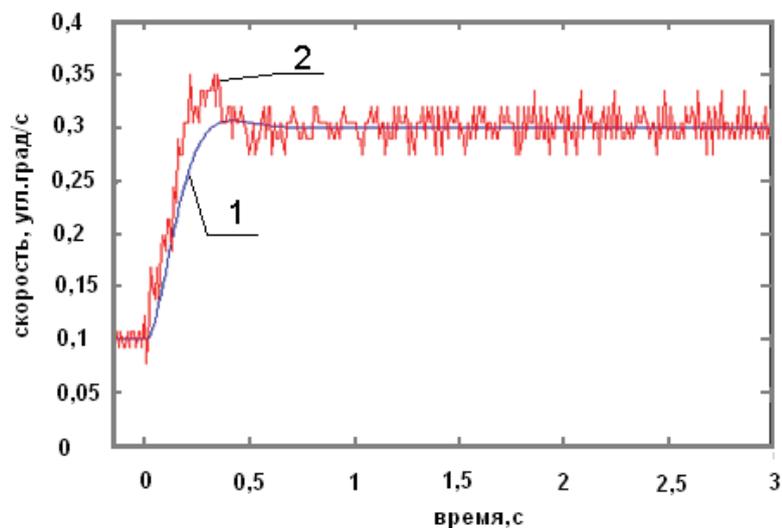


Рис. 4. Эталонная кривая (кривая 1) переходного процесса в замкнутом контуре скорости математической модели (1), настроенном на технический оптимум при отработке входного ступенчатого задающего сигнала, и аналогичный процесс в контуре скорости опытного образца ОПУ ТТИ (кривая 2)

Выводы

Проведена параметрическая идентификация, в результате которой получена математическая модель, удовлетворительно описывающая поведение реального объекта – опытного образца ОПУ ТТИ.

Применение разработанной модели при синтезе САР опытного образца ОПУ ТТИ приводит к гарантированному обеспечению желаемых качественных показателей проектируемой системы, а также значительно сокращает время на ее настройку.

Литература

1. Кротенко В.В., Толмачев В.А., Томасов В.С., Сеницын В.А. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 11. – С. 23–30.
2. Гурьянов А.В., Кротенко В.В. Параметрический синтез цифровых систем управления с широтно-импульсными преобразователями и эталонными моделями // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 3. – С. 17–24.
3. Микеров А.Г. Управляемые вентильные двигатели малой мощности: Учеб. пособие. – СПб: Изд-во ГЭТУ, 1997. – 64 с.
4. Takeshita T., Matsui N. Sensorless Brushless DC Motor Drive with EMF Constant Identifier // IECON-94. –1994. – V.1. – P. 8–13.
5. Ljung L. System Identification Toolbox 7 User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/ident/ident.pdf, своб.
6. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 279 с.

Ильина Аглия Геннадьевна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник, dvanoska@mail.ru

УДК 519.713

ДИНАМИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДВОИЧНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Ушаков, Е.С. Яицкая

Ставится и решается задача использования возможностей динамического наблюдения, разработанного в основном применительно к дискретным системам над бесконечными полями, на случай систем над конечными двоичными полями Галуа. Основное внимание сосредоточено на реализации динамического наблюдения (ДН) за состоянием нелинейных двоичных динамических систем (ДДС) с учетом практики решения этой проблемы для случая линейных ДДС. Поставленная задача решается в три этапа: линеаризация нелинейной ДДС, формирование процесса ДН линеаризованной ДДС и вычленение наблюдений за состоянием исходной нелинейной ДДС. Приводится пример.

Ключевые слова: двоичная динамическая система, линейная, нелинейная, линеаризация, динамическое наблюдение, матричное уравнение Сильвестра, темп сходимости, индекс нильпотентности.

Введение

Концепция динамического наблюдения появилась и разрабатывалась в основном применительно к непрерывным и дискретным системам над бесконечными полями [1–3]. Интенсивное развитие телекоммуникационных сетей как в направлении их технологического совершенствования, так и в направлении усложнения модельного описания обнаружило, что канальная среда (КС) модельно представляет собой двоичную динамическую систему [4]. Если КС дополнить терминальными устройствами (ТУ) приема, обработки, хранения и преобразования двоичной информации, то их агрегатное объединение получает описание в одной из возможных форм – линейной двоичной динамической системы (ЛДДС) или нелинейной двоичной динамической системы (НДДС). Естественным образом встает задача формирования алгоритмической среды, средствами которой для целей задач диагностики и обеспечения помехозащиты можно было бы наблюдать состояние таких систем. Этой проблеме применительно к классу НДДС посвящается предлагаемая вниманию читателя статья.

Постановка задачи

Как и в случае динамических систем над бесконечными полями, алгоритмическое обеспечение формирования динамического наблюдающего устройства (ДНУ) над двоичным полем Галуа получило достаточно глубокую разработку только для класса ЛДДС [4]. В этой связи для того, чтобы перенести

имеющиеся результаты по построению двоичного динамического наблюдающего устройства ЛДДС на класс НДДС, предлагается решение задачи в три этапа. На первом этапе путем агрегирования переменных на основе расширения булева базиса компонентами базиса Жегалкина [5] строится расширенное эквивалентное линейное представление НДДС. На втором этапе строится ДНУ расширенной размерности применительно к эквивалентному линейному представлению НДДС с использованием информации о входной и выходной кодовых последовательностях наблюдаемой НДДС. На третьем этапе из вектора наблюдающего устройства, являющегося оценкой состояния эквивалентного линейного представления НДДС, вычленяется с помощью матрицы-проектора составляющее состояние исходной двоичной нелинейной динамической системы.

К сказанному следует добавить, что поставленная и решаемая задача может найти неожиданное направление использования. Это связано с тем, что задача помехозащитного декодирования может быть сформулирована как задача наблюдения состояния регистра сдвига [6], начальное состояние которого представляет собой двоичную кодовую последовательность, искажающую передаваемую информацию в двоичном канале связи. Если источник искажений в двоичной канальной среде моделируется в форме НДДС, то положения динамического наблюдения, развиваемые в статье, оказываются применимы для решения задач помехозащитного декодирования и для данного случая.

Базовые концепции динамического наблюдения линейных двоичных систем

Базовые концепции динамического наблюдения ЛДДС представим в виде алгоритма синтеза двоичного ДНУ.

Алгоритм 1 (А.1) синтеза устройства двоичного динамического наблюдения ЛДДС

1. Представить ЛДДС, состояние которой подлежит динамическому наблюдению, с помощью векторно-матричного описания

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad x(0) = x_0, \quad y(k) = Cx(k) + Nu(k), \quad (1)$$

де x, u, y – соответственно n -мерный вектор состояния, r -мерный вектор входной последовательности и l -мерный вектор выходной последовательности; матрицы A, B, C, N согласованы по размерности с векторами x, u и y ; элементы векторов и матриц принадлежат двоичному простому полю Галуа $GF(2)$.

2. Представить двоичное ДНУ, использующее всю доступную для непосредственного измерения информацию об ЛДДС (1), в виде входной последовательности $u(k)$ и выходной $y(k)$ в форме

$$z(k+1) = \Gamma z(k) + Ly(k) + Gu(k), \quad z(0) = z_0, \quad (2)$$

где z – n -мерный вектор состояния ДНУ, матрица Γ имеет заданный индекс нильпотентности ν , который определяет динамику процесса наблюдения, а пара матриц (L, G) обладает свойствами $L = \arg \{ \text{contr}(\Gamma, L) \}$, $G = \arg \{ \text{contr}(\Gamma, G) \}$, где $\text{contr} \{ (*), (\bullet) \}$ – предикат наличия полной управляемости пары матриц $\{ (*), (\bullet) \}$.

3. Поставить задачу наблюдения вектора x состояния системы (1) в среде ДНУ (2) в виде

$$z(k) = Tx(k) + \theta(k), \quad \forall k, \quad (3)$$

где T – $(n \times n)$ -матрица преобразования подобия; $\theta(k)$ – вектор невязки наблюдения (ВНН).

4. Описать согласно утверждению, представленному в [6], процесс по ВНН $\theta(k)$ рекуррентным векторно-матричным уравнением

$$\theta(k+1) = \Gamma \theta(k), \quad \theta(0) = Tx(0) + z(0). \quad (4)$$

5. Представить задачу наблюдения вектора $x(k)$ текущего состояния ЛДДС (1), воспользовавшись явным (степенным) решением (4) и условием обнуления состояния ДНУ при запуске ($z(0) = 0$):

$$\theta(k) = \Gamma^k Tx(0), \quad (5)$$

$$z(k) = Tx(k) + \Gamma^k \theta(0). \quad (6)$$

6. Решить матричное уравнение Сильвестра относительно матрицы подобия T :

$$\Gamma T + TA = LC, \quad G = TB. \quad (7)$$

При этом решение уравнения Сильвестра (7) гарантируется перечисленными в п. 2 условиями и непересякаемостью алгебраических спектров собственных значений матриц Γ и A для случая, когда последняя не имеет нулевых собственных значений.

7. Оценить правильность назначения матрице Γ свойства нильпотентности с индексом ν [7] путем контроля при $k \geq \nu$ выполнения соотношений $\Gamma^k = \mathbf{0}$ и $z(k) = \mathbf{T}x(k)$.

8. Сформировать оценку $\hat{x}(k)$ вектора состояния $x(k)$ ЛДДС в форме

$$\hat{x}(k) = \mathbf{T}^{-1} z(k), \tag{8}$$

которая при $k \geq \nu$ удовлетворяет соотношению $\hat{x}(k) = x(k)$.

Постановка задачи наблюдения нелинейной двоичной динамической системы

Каноническое представление «вход–состояние–выход» произвольной двоичной динамической системы задается в виде двух векторных выражений:

$$x_n(k+1) = \lambda[x_n(k), u(k)], \tag{9}$$

$$y(k) = \delta[x_n(k)], \tag{10}$$

в которых $\lambda[x_n(k), u(k)]$, $\delta[x_n(k)]$ именуется соответственно функциями перехода и выхода. Если функции перехода и выхода допускают представление в виде линейных операций умножения матрицы на вектор и суммирования, то они получают представление вида (1), если такой возможности нет, то соотношения (9)–(10) задают НДДС с вектором состояния x_n размерности $\dim x_n = n_n = \lceil \log_2 n \rceil$.

Если поставить задачу динамического наблюдения вектора состояния x_n НДДС (9)–(10), т.е. его восстановления в среде динамического наблюдающего устройства на основе непосредственного измерения входной последовательности $u(k)$ и выходной последовательности $y(k)$, то следует признать, что в классе нелинейных представлений в силу отсутствия на настоящий момент опыта решения такого рода задач она может не получить решения с гарантированным качеством. Тем не менее, решение таких задач с гарантированным качеством в классе линейных представлений имеет хорошую прикладную практику.

Таким образом, встает задача построения эквивалентного линейного представления НДДС (9)–(10) в предположении, что правила λ и δ заданы аналитически в виде булевых функций в булевом базисе, в виде ЛДДС

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{x}(k) + \tilde{\mathbf{B}}u(k), \quad \tilde{x}(0) = \tilde{x}_0, \quad y(k) = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{x}(k) + \mathbf{N}u(k), \tag{11}$$

где \tilde{x} – вектор состояния эквивалентного линейного представления НДДС размерности \tilde{n} ; $y(k)$ – вектор выходной последовательности той же размерности l , что в (1) и (10); $u(k)$ – вектор входной последовательности той же размерности r , что в (1) и (10); $\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}}$ – матрицы, согласованные по размерности с переменными так, что $\dim \tilde{\mathbf{A}} = \tilde{n} \times \tilde{n}$; $\dim \tilde{\mathbf{B}} = \tilde{n} \times r$; $\dim \tilde{\mathbf{C}} = l \times \tilde{n}$. Задача формирования эквивалентного линейного представления НДДС вида (11) решается в предположении, что достижимо представление вектора \tilde{x} в форме

$$\tilde{x} = \text{col}\{x_n, \tilde{x}\}. \tag{12}$$

Процедура построения эквивалентного линейного представления НДДС реализуется в виде следующего алгоритма.

Алгоритм 2 (А.2) построения эквивалентного линейного представления НДДС

1. Составить аналитические представления булевых функций, построенных в булевом базисе, на основании таблиц переходов и выходов НДДС как таблиц истинности функций (9) и (10) относительно булевых переменных $u(k)$, $x_n(k)$, $x_n(k+1)$, $y(k)$.

2. Модифицировать аналитические выражения п.1, используя арифметику базиса Жегалкина путем замены всех инверсий переменных суммированием по модулю два инвертируемой переменной с единицей, осуществляемой в форме $\bar{x}_i(k) = x_i(k) \oplus 1$ [8].

3. Ввести в рассмотрение двухкомпонентный расширенный вектор \tilde{x} состояния системы, полученной в п. 2, первый компонент которого совпадает с вектором x_n состояния линеаризируемой НДДС, а второй имеет своими элементами все возможные конъюнкции переменных аддитивных композиций, связанных операцией суммирования по модулю два.

4. Сформировать линеаризованное представление НДДС с вектором состояния \tilde{x} , записанное в покомпонентной форме.

5. Составить предварительную линеаризованную модель НДДС в канонической векторно–матричной форме (11), списав матрицы $\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}}, \mathbf{N}$ с покомпонентного представления п. 4.

6. Вычислить ранг матрицы управляемости пары (\tilde{A}, \tilde{B}) и матрицы наблюдаемости пары (\tilde{A}, \tilde{C}) .
7. В случае отличия вычисленных в п. 6 рангов от величины $\tilde{n} = \dim \tilde{x}$ осуществить минимизацию размерности вектора состояния эквивалентного линейного представления НДДС с использованием аппарата булевых (селлерсовских) производных [9].
8. Построить минимизированное эквивалентное линейное представление НДДС с вектором состояния \tilde{x}_m и матрицами $\tilde{A}_m, \tilde{B}_m, \tilde{C}_m, N$.

Очевидно, что ДНУ вектора \tilde{x} состояния эквивалентного линейного представления НДДС (11) строится по той же схеме, что и ДНУ вектора x состояния ЛДДС (1), так что для него можно записать

$$\tilde{z}(k+1) = \tilde{\Gamma} \tilde{z}(k) + \tilde{L} y(k) + \tilde{G} u(k), \quad \tilde{z}(0) = \tilde{z}_0, \quad (13)$$

где \tilde{z} – вектор состояния ДНУ размерности \tilde{n} ; $\tilde{\Gamma}, \tilde{L}, \tilde{G}$ – матрицы, согласованные по размерности с переменными ДНУ, так что $\dim \tilde{\Gamma} = \tilde{n} \times \tilde{n}$; $\dim \tilde{L} = \tilde{n} \times r$; $\dim \tilde{G} = l \times \tilde{n}$. Наделение матрицы $\tilde{\Gamma}$ свойством нильпотентности с индексом, равным \tilde{v} , позволит обеспечить выполнение векторно-матричного соотношения, аналогичного (8), записываемого при $k \geq \tilde{v}$ в форме

$$\tilde{z}(k) = \tilde{T} \tilde{x}(k), \quad (14)$$

где матрица подобия \tilde{T} находится решением матричного уравнения Сильвестра

$$\tilde{\Gamma} \tilde{T} + \tilde{T} \tilde{A} = \tilde{L} \tilde{C}, \quad \tilde{G} = \tilde{T} \tilde{B}. \quad (15)$$

В силу равенства размерностей векторов состояния эквивалентного линейного представления НДДС и его динамического наблюдающего устройства оказывается справедливым векторно-матричное соотношение для оценки $\tilde{\hat{x}}(k)$ вектора состояния $\tilde{x}(k)$, эквивалентное (8),

$$\tilde{\hat{x}}(k) = \tilde{T}^{-1} \tilde{z}(k), \quad (16)$$

которая при $k \geq \tilde{v}$ удовлетворяет соотношению $\tilde{\hat{x}}(k) = \tilde{x}(k)$.

В случае выполнимости представления вектора состояния эквивалентного линейного представления НДДС в форме (12) для вектора x_n состояния исходной НДДС получим оценку

$$\hat{x}_n(k) = \tilde{C}_n \tilde{\hat{x}}(k) = \tilde{C}_n \tilde{T} \tilde{z}(k), \quad (17)$$

где

$$\tilde{C}_n = \begin{bmatrix} \tilde{\Gamma}^{l \times n_n} & \mathbf{0}_{l \times (\tilde{n} - n_n)} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Выражение (17) в случае справедливости (18) представляет собой решение задачи динамического наблюдения вектора x_n состояния исходной НДДС вида (9)–(10). Таким образом, задача динамического наблюдения НДДС будет успешно решена, если удастся решить задачу построения ее эквивалентного линейного представления (11).

Основной результат. Построение устройства двоичного динамического наблюдения за состоянием НДДС на основе линеаризованного представления

Решение проблемы, вынесенной в заголовок раздела, представим в виде алгоритма построения устройства двоичного динамического наблюдения за состоянием НДДС на основе линеаризованного представления.

Алгоритм 3 (А.3) построения устройства двоичного динамического наблюдения за состоянием НДДС на основе линеаризованного представления

1. Задать НДДС вида (9), (10) в форме совмещенной таблицы истинности.
2. Сформировать эквивалентное линеаризованное представление НДДС вида (11) на основе алгоритма А.2.
3. Построить в произвольном базисе устройство двоичного динамического наблюдения за состоянием НДДС с вектором состояния \tilde{z} и матрицей подобия \tilde{T} на основе использования алгоритма А.1.
4. Сформировать оценку наблюдения $\tilde{x}_e(k)$ вектора состояния $\tilde{x}(k)$ линеаризованной НДДС с помощью соотношения $\tilde{x}_e(k) = \tilde{T}^{-1} (\tilde{z}(k) + \tilde{\Gamma}^k \tilde{\theta}(k))$.
5. Сформировать оценку $x_{ne}(k)$ вектора состояния $x_n(k)$ исходной НДДС с помощью соотношения $x_{ne}(k) = \tilde{C}_n \tilde{x}_e(k)$, где \tilde{C}_n определяется выражением (18).

6. Проверить правильность функционирования двоичного динамического наблюдающего устройства НДДС, построенного на основе эквивалентного линейного представления НДДС, на примере тестовой входной последовательности.

Пример

Ключевым моментом формирования двоичного динамического наблюдающего устройства НДДС является процедура построения эквивалентного линейного представления НДДС. Проиллюстрируем алгоритм А.2 на примере НДДС, преобразующей унитарный код $u(k) = 1(k)$ в периодическую тестовую последовательность $y(k) : 11010|11010|...$

1. Сформируем функции (9), (10), задав их в форме совмещенной таблицы истинности, на основании которых, а также процедуры минимизации булевых функций, получим:

$$\begin{cases} x_{n1}(k+1) = \bar{u}(k)x_{n1}(k)x_{n2}(k)\bar{x}_{n3}(k) \vee u(k)\bar{x}_{n1}(k)x_{n2}(k)\bar{x}_{n3}(k), \\ x_{n2}(k+1) = \bar{x}_{n1}(k)x_{n2}(k) \vee u(k)\bar{x}_{n1}(k)x_{n3}(k) \vee \bar{u}(k)x_{n2}(k)\bar{x}_{n3}(k), \\ x_{n3}(k+1) = \bar{u}(k)\bar{x}_{n1}(k)x_{n3}(k) \vee u(k)\bar{x}_{n1}(k)\bar{x}_{n2}(k), \\ y(k) = \bar{x}_{n1}(k)\bar{x}_{n2}(k) \vee \bar{x}_{n1}(k)\bar{x}_{n3}(k). \end{cases}$$

выход $y(k)$	1	1	0	1	0	*	*	*
вход $u(k)$	исходные состояния $x_n(k)$					неиспользуемые состояния		
	000	001	011	010	110	100	101	111
0	000	001	011	010	110			
1	001	011	010	110	000			
состояние перехода	$x_n(k+1) = \{x_{n1}(k+1)x_{n2}(k+1)x_{n3}(k+1)\}$							
* – пустой символ								

Таблица 1. Совмещенная таблица истинности функций перехода и выхода

2. Модифицируем аналитические выражения п.1, построенные с помощью элементов арифметики вида $\bar{x}_i(k) = x_i(k) \oplus 1$ базиса Жегалкина, в результате чего получим:

$$\begin{cases} x_{n1}(k+1) = x_{n1}(k)x_{n2}(k) + x_{n1}(k)x_{n2}(k)x_{n3}(k) + u(k)[x_{n2}(k) + x_{n2}(k)x_{n3}(k)], \\ x_{n2}(k+1) = x_{n2}(k) + x_{n1}(k)x_{n2}(k)x_{n3}(k) + \\ + u(k)[x_{n3}(k) + x_{n1}(k)x_{n2}(k) + x_{n1}(k)x_{n3}(k) + x_{n2}(k)x_{n3}(k)], \\ x_{n3}(k+1) = x_{n3}(k) + x_{n1}(k)x_{n3}(k) + \\ + u(k)[1 + x_{n1}(k) + x_{n2}(k) + x_{n3}(k) + x_{n1}(k)x_{n2}(k) + x_{n1}(k)x_{n3}(k)], \\ y(k) = 1 + x_{n1}(k) + x_{n2}(k)x_{n3}(k) + x_{n1}(k)x_{n2}(k)x_{n3}(k). \end{cases}$$

3. Введем в рассмотрение двухкомпонентный расширенный вектор $\tilde{x} = col\{x_n, \tilde{x}\}$ состояния эквивалентной двоичной системы (11) в силу соотношений

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k) = col\{x_n, \tilde{x}\} = col\{\tilde{x}_1(k) = x_{n1}(k), \tilde{x}_2(k) = x_{n2}(k), \tilde{x}_3(k) = x_{n3}(k), \tilde{x}_4(k) = x_{n1}(k)x_{n2}(k), \\ \tilde{x}_5(k) = x_{n2}(k)x_{n3}(k), \tilde{x}_6(k) = x_{n1}(k)x_{n3}(k), \tilde{x}_7(k) = x_{n1}(k)x_{n2}(k)x_{n3}(k), \\ \tilde{x}_9(k) = u(k)x_{n2}(k), \tilde{x}_{10}(k) = u(k)x_{n3}(k), \tilde{x}_{11}(k) = u(k)x_{n1}(k)x_{n2}(k), \\ \tilde{x}_{12}(k) = u(k)x_{n1}(k)x_{n3}(k), \tilde{x}_{13}(k) = u(k)x_{n2}(k)x_{n3}(k), \tilde{x}_{14}(k) = u(k)x_{n1}(k)x_{n2}(k)x_{n3}(k)\}; \end{aligned}$$

4. Сформируем линеаризованное представление НДДС с вектором состояния \tilde{x} в форме (11), записанное в поординатном виде:

$$\begin{cases}
 \tilde{x}_1(k+1) = \tilde{x}_4(k) + \tilde{x}_7(k) + \tilde{x}_9(k) + \tilde{x}_{13}(k), \\
 \tilde{x}_2(k+1) = \tilde{x}_2(k) + \tilde{x}_7(k) + \tilde{x}_{10}(k) + \tilde{x}_{11}(k) + \tilde{x}_{12}(k) + \tilde{x}_{13}(k), \\
 \tilde{x}_3(k+1) = \tilde{x}_3(k) + \tilde{x}_6(k) + \tilde{x}_8(k) + \tilde{x}_9(k) + \tilde{x}_{10}(k) + \tilde{x}_{11}(k) + \tilde{x}_{12}(k) + u(k), \\
 \tilde{x}_4(k+1) = \tilde{x}_4(k) + \tilde{x}_9(k) + \tilde{x}_{13}(k), \\
 \tilde{x}_5(k+1) = \tilde{x}_5(k) + \tilde{x}_7(k) + \tilde{x}_{10}(k) + \tilde{x}_{12}(k), \\
 \tilde{x}_6(k+1) = 0, \\
 \tilde{x}_7(k+1) = 0, \\
 \tilde{x}_8(k+1) = \tilde{x}_9(k) + \tilde{x}_{11}(k) + \tilde{x}_{13}(k) + \tilde{x}_{14}(k), \\
 \tilde{x}_9(k+1) = \tilde{x}_9(k) + \tilde{x}_{10}(k) + \tilde{x}_{11}(k) + \tilde{x}_{12}(k) + \tilde{x}_{13}(k) + \tilde{x}_{14}(k), \\
 \tilde{x}_{10}(k+1) = \tilde{x}_8(k) + \tilde{x}_9(k) + \tilde{x}_{11}(k) + u(k), \\
 \tilde{x}_{11}(k+1) = \tilde{x}_9(k) + \tilde{x}_{11}(k) + \tilde{x}_{13}(k), \\
 \tilde{x}_{12}(k+1) = 0, \\
 \tilde{x}_{13}(k+1) = \tilde{x}_{10}(k) + \tilde{x}_{12}(k) + \tilde{x}_{13}(k) + \tilde{x}_{14}(k), \\
 \tilde{x}_{14}(k+1) = 0, \\
 \tilde{y}(k) = \tilde{x}_1(k) + \tilde{x}_5(k) + \tilde{x}_7(k) + u(k).
 \end{cases}$$

5. Списываем с полученных в п. 4 соотношений матрицы \tilde{A} , \tilde{B} , \tilde{C} , N представления (11).

6. Пользуясь матричными компонентами эквивалентного представления (11), продолжаем его исследование в соответствии с пп. 6–8 алгоритма А. 2.

Заключение

Завершая рассмотрение проблемы, вынесенной в заголовок статьи, авторы вынуждены констатировать на примере конкретной задачи преобразования кодов, что решение этой задачи средствами линейных ДДС размерности n и средствами линеаризованной нелинейной ДДС размерности \tilde{n}_m обнаруживает существенное различие этих величин, удовлетворяющих отношению порядка $n \ll \tilde{n}_m$. Таким образом, перед исследователями ставится задача анализа причин этого различия и выяснения класса ДДС, размерность n_{oc} которых удовлетворяет неравенству $n < n_{oc} < \tilde{n}_m$.

Литература

1. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
2. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ/ В.В. Григорьев, В.Н. Дроздов, В.В. Лаврентьев, А.В. Ушаков – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 245 с.
3. Дударенко Н.А., Слита О.В., Ушаков А.В. Математические основы современной теории управления: аппарат метода пространства состояний: учебное пособие / Под ред. А.В. Ушакова – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 323 с.
4. Мельников А.А., Ушаков А.В. Двоичные динамические системы дискретной автоматики / Под ред. А.В. Ушакова. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – 214 с.
5. Горбатов В.А. Фундаментальные основы дискретной автоматики. Информационная математика. – М.: Наука, Физматлит, 1999.
6. Ушаков А.В., Яицкая Е.С. Помехозащитное декодирование систематических кодов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 11. – С.77–83.
7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – 5-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 560 с.
8. Глава 4. Метод приведения систем логического типа к форме линейной последовательностной машины // В кн.: Дубаренко В.В., Коновалов А.С., Кучмин А.Ю. Оптимизация динамики систем при управлении в нестационарных условиях. Учебное пособие. – СПб: СПбГУАП, 2008. – 77 с.
9. Селлерс Ф. Методы обнаружения ошибок в работе ЭЦВМ. – М.: Мир, 1972. – 310 с.

Ушаков Анатолий Владимирович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ushakov-AVG@yandex.ru

Яицкая Елена Сергеевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, yaitskayaes@mail.ru

УДК 531

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

С.Е. Иванов

Для исследования виброзащитных систем необходим качественный и количественный анализ соответствующих математических моделей. В качестве модели принимается система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая включает нелинейные характеристики в форме многочленов от фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами. При анализе нелинейных виброзащитных систем применяется метод многочленных преобразований, который позволяет получить достаточно подробные качественные и количественные характеристики динамики систем.

Ключевые слова: виброзащитная система, установившейся режим колебаний, нелинейная система с двумя степенями свободы.

Введение

Предметом рассмотрения являются нелинейные колебательные динамические системы полиномиальной структуры с периодическими коэффициентами [1].

Исследование колебательных процессов в таких системах может проводиться различными методами нелинейной механики [2]. В работах А. Пуанкаре, Б. ван дер Поля, А.Н. Крылова, Н.Н. Боголюбова, А.А. Андропова предложены теоретические методы исследования нелинейных динамических систем [3]. Метод преобразования дифференциальных уравнений в форме степенных многочленов по фазовым переменным был предложен в работах А. Пуанкаре и А. Дюляка. Применение этих методов связано с большим объемом вычислений, что приводит к необходимости создания алгоритмов и программ, позволяющих эффективно выполнять требуемые выкладки средствами вычислительной техники.

С целью расширения области применения указанный метод был модифицирован в работе Г.И. Мельникова [4] и получил название метода многочленных преобразований. Данный метод применим к широкому кругу нелинейных задач, где нелинейные части системы дифференциальных уравнений имеют общую структуру. Динамические системы описываются дифференциальными уравнениями до шестого порядка с нелинейной частью в виде многочлена до четвертой степени относительно фазовых координат с периодическими коэффициентами.

Для реализации метода многочленных преобразований автором составлен пакет программ, позволяющий проводить исследования установившихся и переходных режимов колебаний нелинейных виброзащитных систем с двумя степенями свободы в условиях периодического кинематического возмущения [5]. Точность получаемых результатов подтверждается посредством сравнения с решениями, получаемыми численными методами. Полученные результаты показывают применимость метода для качественных и количественных оценок исследуемых переходных и установившихся колебаний динамических систем, находящихся в условиях периодического внешнего воздействия.

Исследование виброзащитной системы

Рассматривается математическая модель виброзащитной системы с нелинейными амортизаторами и демпферами в условиях внешнего периодического возмущения [6]. Виброзащитная система состоит из прибора массой m_1 (объект виброзащиты), установленного на платформу массой m_2 , которая закреплена на вибрирующем основании. Предполагается, что упругие элементы системы имеют вид полинома третьей степени $kx + lx^2 + px^3$, демпфирующие элементы имеют нелинейную кубическую характеристику $c\dot{x} + d\dot{x}^3$ (здесь x_1, x_2 – абсолютное перемещение прибора и платформы), а основание осуществляет вертикальные колебания согласно уравнениям $f(t) = a(1 + b \cos(\omega t) + \varepsilon \sin^3(\omega t))$.

Рассматривается относительное перемещение прибора и платформы: $y_1 = x_1 - f, y_2 = x_2 - f$. Уравнения движения в относительных координатах имеют вид [7]

$$m_1 \ddot{y}_1 + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + d_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)^3 + k_1(y_1 - y_2) + l_1(y_1 - y_2)^2 + p_1(y_1 - y_2)^3 = -m_1 \ddot{f};$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + d_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^3 + k_2(y_2 - y_1) - l_2(y_2 - y_1)^2 + p_2(y_2 - y_1)^3 + c_2 \dot{y}_2 + d_2 \dot{y}_2^3 + k_2 y_2 + l_2 y_2^2 + p_2 y_2^3 = -m_2 \ddot{f}; \quad (1)$$

$$\ddot{f}(t) = a\omega^2(-b \cos(\omega t) + 6\varepsilon \sin(\omega t) \cos^2(\omega t) - 3\varepsilon \sin^3(\omega t)).$$

Вводятся дополнительные комплексно-сопряженные переменные [8]:

$$q_0 = \exp(i\omega t), \bar{q}_0 = \exp(-i\omega t), \lambda_1 = i\omega.$$

Система дифференциальных уравнений (1) записывается в матричной форме:

$$\dot{X} = PX + R.$$

С помощью линейного преобразования $Y = DX$ система шестого порядка приводится к виду

$$\dot{Y} = \Lambda Y + R$$

с диагональной матрицей. Выполняется многочленное преобразование

$$y_s = z_s + \sum_{|v|=2}^4 a_v^s Z^v, (s = 3, 4, 5, 6),$$

результатом которого является система

$$\dot{z}_s = \lambda z_s + \sum_{|v|=2}^4 q_v^s Z^v, (s = 3, 4, 5, 6).$$

Дополнительные комплексно-сопряженные переменные не преобразовываются: $y_s = z_s, (s = 1, 2)$.

Особые значения индекса при фиксированном S находятся из двух уравнений:

$$\lambda_1 v_1 + \bar{\lambda}_1 v_2 + \lambda_2 v_3 + \bar{\lambda}_2 v_4 + \lambda_3 v_5 + \bar{\lambda}_3 v_6 - \lambda_s = 0,$$

$$v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 = 2, 3, 4, s = 2, 3.$$

В нерезонансном случае, когда собственные частоты колебаний системы и частота вибрации не совпадают и не кратны, находим следующие особые индексы:

$$\text{при } q_v^3 : v = (0, 0, 1, 0, 1, 1), v = (0, 0, 2, 1, 0, 0), v = (1, 1, 1, 0, 0, 0),$$

$$\text{при } q_v^4 : v = (0, 0, 0, 1, 1, 1), v = (0, 0, 1, 2, 0, 0), v = (1, 1, 0, 1, 0, 0),$$

$$\text{при } q_v^5 : v = (0, 0, 1, 1, 1, 0), v = (0, 0, 0, 0, 2, 1), v = (1, 1, 0, 0, 1, 0),$$

$$\text{при } q_v^6 : v = (0, 0, 1, 1, 0, 1), v = (0, 0, 0, 0, 1, 2), v = (1, 1, 0, 0, 0, 1).$$

Постоянные q_v^S приравнивают нулю при неособых значениях индексов; при таких значениях вычисляют постоянные a_v^S и, наоборот, при особых значениях индексов считают коэффициенты a_v^S равными нулю и вычисляют q_v^S . Методом многочленных преобразований в нерезонансном случае получена автономная система, определяемая шестью параметрами:

$$\begin{aligned} \dot{z}_3 &= (\lambda_2 + q_{111000}^3) z_3 + q_{001011}^3 z_3 z_5 \bar{z}_5 + q_{002100}^3 z_3^2 \bar{z}_3 \\ \dot{z}_5 &= (\lambda_3 + q_{110010}^5) z_5 + q_{001110}^5 z_3 \bar{z}_5 z_5 + q_{000021}^5 z_5^2 \bar{z}_5 \end{aligned} \quad (2)$$

Автономная система содержит шесть существенных параметров, исходная определяется 23 параметрами. Стационарные режимы колебания находятся путем приравнивания правых частей системы к нулю.

Установившийся режим колебаний виброзащитной системы является полигармоническим. Колебания системы происходят с частотой внешней силы. Перейдем к новым комплексно-сопряженным переменным:

$$z_{3,4} \equiv \rho_1 \exp(\pm i\theta_1), z_{5,6} \equiv \rho_2 \exp(\pm i\theta_2).$$

Преобразованная автономная система (2) в новых переменных записывается в виде

$$\dot{\rho}_1 = \rho_1 \operatorname{Re}(\lambda_2 + q_{111000}^3) + \rho_1 \rho_2^2 \operatorname{Re} q_{001011}^3 + \rho_1^3 \operatorname{Re} q_{002100}^3,$$

$$\dot{\theta}_1 = \operatorname{Im}(\lambda_2 + q_{111000}^3) + \rho_2^2 \operatorname{Im} q_{001011}^3 + \rho_1^2 \operatorname{Im} q_{002100}^3,$$

$$\dot{\rho}_2 = \rho_2 \operatorname{Re}(\lambda_3 + q_{110010}^5) + \rho_2 \rho_1^2 \operatorname{Re} q_{001110}^5 + \rho_2^3 \operatorname{Re} q_{000021}^5,$$

$$\dot{\theta}_2 = \operatorname{Im}(\lambda_3 + q_{110010}^5) + \rho_1^2 \operatorname{Im} q_{001110}^5 + \rho_2^2 \operatorname{Im} q_{000021}^5$$

В результате применения метода многочленных преобразований с заданной точностью получена преобразованная автономная система. Преобразованная система содержит существенно меньшее количество ненулевых коэффициентов, чем исходная, что упрощает ее исследование. С помощью разработанных программ найдены существенные константы, получены числовые оценки переходных и установившихся режимов колебаний.

Заключение

Рассматриваемая математическая модель нелинейных виброзащитных динамических систем представляет собой систему дифференциальных уравнений, содержащую нелинейные характеристики полиномиальной структуры с периодическими параметрами [9]. Исследование динамических систем проводится методом многочленных преобразований, находятся существенные параметры нелинейной динамической системы, определяющие качество установившихся и переходных процессов.

Нелинейные части исследуемой системы представлены в форме многочлена до четвертой степени относительно фазовых переменных с периодическими коэффициентами [10]. Разработан алгоритм метода, удобный для программирования, и составлен пакет программ для реализации метода. Программы применимы для исследования установившихся и переходных режимов колебаний нелинейных виброзащитных систем с двумя степенями свободы в условиях внешнего периодического возмущения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 10-08-01046-а

Литература

1. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 394 с.
2. Вибрации в технике. Справочник в 6-ти томах / Под ред. К.В. Фролова. – М.: Маш., 1995. – 456 с.
3. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981. – 568 с.
4. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. – Л.: Маш., 1975. – 198 с.
5. Бутенин Н.В. Введение в теорию нелинейных колебаний. – М.: Маш., 1991. – 344 с.
6. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной техники и технологии. – М.: Наука, 1981. – 318 с.
7. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Прикладные методы теории колебаний. – М.: Наука, 1988. – 308 с.
8. Иванов С.Е. О реализации численно-аналитического метода многочленных преобразований на компьютере. // Современные технологии: Труды молодых ученых ИТМО / Под ред. проф. С.А. Козлова. – СПб: СПб ГИТМО(ТУ), 2001. – С. 138–141.
9. Мельников В.Г., Мельников Г.И., Иванов С.Е. Компьютерные технологии в механике приборных систем. Учебное пособие / Под ред. В.Г. Мельникова. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 127 с.
10. Фролов К.В. Нелинейные задачи динамики машин. – М.: Маш., 1992. – 376 с.

Иванов Сергей Евгеньевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, SIvanov@mail.ifmo.ru

УДК 531.383-11:531.714.7

АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн

Рассмотрены вопросы использования микромеханических гироскопов на высокодинамичных объектах при значительных инерционных ударных нагрузках. Показано, что такие удары приводят к контактным взаимодействиям элементов конструкции. Приведены оценки деформаций и прочности упругого подвеса как наиболее ответственного узла прибора при контакте инерционного тела с ограничительными упорами. Определена конфигурация расположения упоров из условий прочности подвеса.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, упругий подвес, удар, контакт, упор.

Введение

Микромеханические гироскопы (ММГ) используются в различных областях навигации и управления движением. Известно о намерениях использовать микромеханические датчики в системах автоматического управления движением высокодинамичных объектов, таких как ракетное и артиллерийское вооружение. Условия эксплуатации подобных систем предполагают наличие интенсивных ударов с уровнями свыше $(2-10) \cdot 10^4 g$ [1,2]. Для использования ММГ на подвижных объектах со сверхвысокими инерционными нагрузками требуется анализ прочности конструкции прибора, что представляется весьма актуальной задачей. Приведенные ниже оценки прочности справедливы для различных типов микромеханических гироскопов, имеющих упругий подвес и гребенчатый электростатический двигатель [3].

Оценка прочности подвеса при ударных воздействиях

В качестве объекта исследования выбран ММГ RR-типа разработки ЦНИИ «Электроприбор» [4], чувствительный элемент которого содержит инерционное тело (ИТ) в виде диска, закрепленного на упругом подвесе (рис. 1). ИТ в автоколебательном режиме совершает первичные угловые колебания в плоскости диска вокруг оси X, возбуждаемые гребенчатым электростатическим двигателем. При наличии угловой скорости основания Ω возникают вторичные угловые колебания вокруг оси Y, амплитуда которых является мерой угловой скорости. Эти колебания измеряются емкостными датчиками системы съема, расположенной под ИТ.

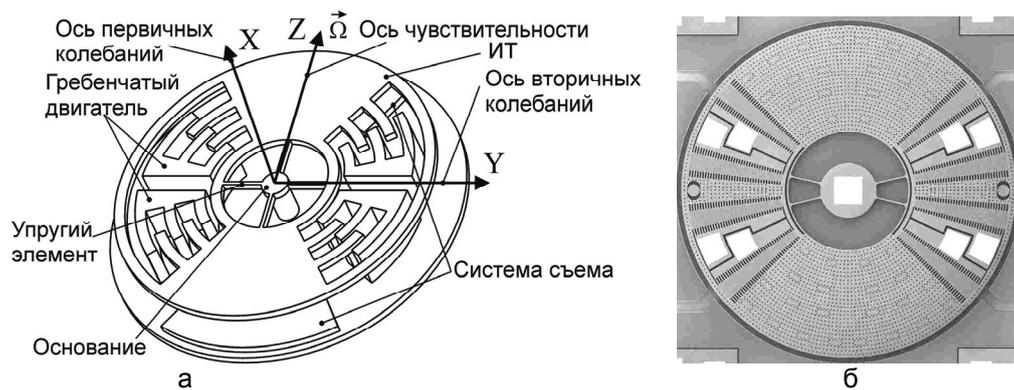


Рис. 1. Конструктивная схема (а) и SEM-фотография (б) ММГ

Касание упруго подвешенного ИТ и неподвижных частей конструкции, приводящее к временному отказу, не допускается в случае требований ударостойкости и обеспечения непрерывной работы ММГ на протяжении всего времени измерения. В случае требований ударопрочности требуется сохранение характеристик прибора после окончания ударного воздействия [5, 6]. Ударное импульсное воздействие на основание ММГ задается законом изменения ускорения $W(t)$, который для объектов различных классов оценивается по экспериментальным данным. Для оценочных расчетов ударопрочности и ударостойкости ММГ может быть достаточным знание только максимального значения ускорения W_{\max} и длительности импульса τ .

Свойства системы «ИТ – упругий подвес» определяются ее собственными частотами. При этом критерием характера относительного движения ИТ при ударе и после него является произведение $\omega_0\tau$, где ω_0 – собственная частота системы (для системы с несколькими собственными частотами обычно это низшая частота поступательных колебаний в направлении действия удара). При $\omega_0\tau < 1$ удар является коротким, форма импульса ускорения незначительна, относительное перемещение достигает максимума после окончания импульса и имеет порядок $u = W_{\max}\tau\omega_0^{-1}$. При $\omega_0\tau > 1$ удар является длинным, перемещение при действии ускорения в первом приближении можно считать квазистатическим, $u = W_{\max}\omega_0^{-2}$.

Для ММГ значения собственных частот обычно превышают 3 кГц, а длительность импульса не менее 0,5 мс. Таким образом, значение $\omega_0\tau = 2\pi \cdot 3000 \cdot 0,0005 > 1$, и при анализе ударных воздействий допустимо использование квазистатического анализа. Перемещение ИТ при ударе с амплитудой $2 \cdot 10^4 g$ будет составлять $u \approx (2 \cdot 10^5) \cdot (2\pi \cdot 3000)^{-2} = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 563 \text{ мкм}$, что превосходит значение зазоров в конструкции чувствительного элемента. Очевидно, что при таких высоких инерционных нагрузках в ММГ будут происходить контактные взаимодействия между элементами прибора, что и является предметом настоящего исследования. Особое внимание уделяется анализу прочности упругого подвеса ИТ как наиболее напряженного элемента конструкции.

Анализ контактных взаимодействий производился методом конечно-элементного анализа (КЭА) в следующей последовательности: определение направлений возможных перемещений ИТ; определение жесткости системы «ИТ – упругий подвес» в заданном направлении; определение перемещений ИТ до возникновения контакта и допустимых инерционных воздействий; формулирование ограничений перемещений подвижных элементов; разработка средств ограничения перемещений и возникающих критических напряжений.

Контактные взаимодействия при нагрузках в плоскости инерционного тела

При нагрузках в плоскости ИТ основные контактные взаимодействия происходят в зоне зубцов гребенчатого электростатического двигателя. Жесткость ИТ в этом направлении чрезвычайно высока, и перемещение ИТ под нагрузкой в основном определяется жесткостью упругого подвеса. При нагрузках в плоскости ИТ вследствие конечной жесткости упругого подвеса происходит перемещение ИТ до касания локальных элементов конструкции, таких как длинные тонкие зубья гребенчатых электростатических двигателей ИТ и статора ММГ (рис. 2). Вследствие малого значения центрального угла зоны зубьев (количество зубьев порядка 100) каждый из них можно приближенно рассматривать как прямолинейный консольный стержень с заделкой с одной стороны. Перемещения и напряжения изгиба будут максимальными для наиболее длинного зуба, когда указанные силы перпендикулярны продольной оси зуба и создают моменты изгиба вокруг оси наименьшего момента инерции. Характер контакта зависит от направления перемещения и осуществляется на гладких участках, в точке контакта касательные совпадают. Точечный характер контакта является следствием того, что радиусы кривизны зубьев различны.

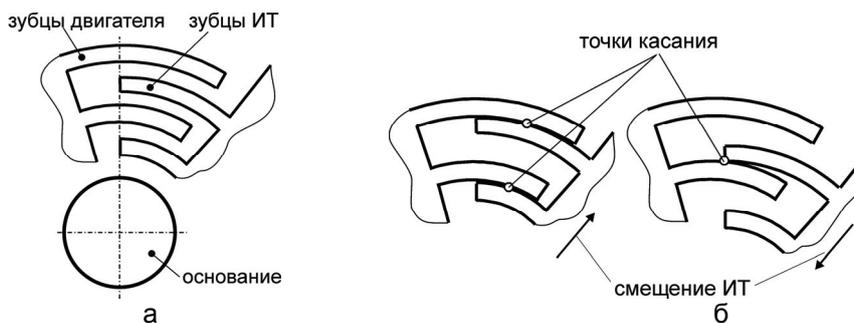


Рис. 2. Номинальное (а) и смещенное (б) положение ИТ

В общем случае произвольного направления ускорения основания W картина контактных взаимодействий получается более сложной. Если иметь в виду, что номинальные зазоры для всех пар зубьев одинаковы, то очевидно, что во всех случаях контакт одного и того же вида должен был бы происходить одновременно по всем парам зубьев. Однако учет неровностей поверхностей зубьев и неравномерность зазоров приводят к кардинальному изменению выводов. Во-первых, местоположение точек контакта по длине зуба становится случайным. Во-вторых, первый контакт происходит только в одной паре зубьев, и лишь при увеличении силы контакты будут возникать в других парах, если до этого не произойдет разрушение одного из контактирующих зубьев.

Специфические задачи расчета прочности возникают в условиях контакта подвижных элементов с неподвижными. Контакт сам по себе опасен, так как может вызвать поломку зубьев или элементов конструкции, но если этого не произошло, происходит разгрузка упругих элементов подвеса ИТ. На рис. 3 показаны результаты расчета напряжений в зубьях двигателя при их контакте, полученные методом КЭА. Верхняя кривая показывает взаимодействие одной пары зубьев, нижняя – трех пар зубьев в случае неравномерного зазора.

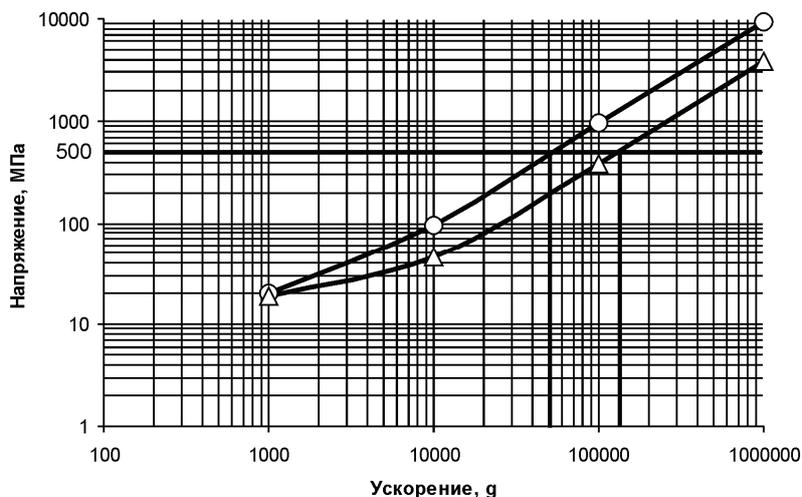


Рис. 3. Контактные взаимодействия зубьев двигателя

В качестве критерия оценки прочности конструкции использовано допустимое нормальное напряжение для кремния, равное $\sigma_{\text{доп}} = 500$ МПа [7]. В случае контакта одной пары зубьев допустимое ускорение удара составляет $5 \cdot 10^4 g$, при контакте трех пар зубьев – более $10^5 g$.

Контактные взаимодействия при нагрузках в направлении, перпендикулярном плоскости инерционного тела

На последовательных этапах разработки для разных модификаций конструкций подвеса разработчиками предлагались и реализовывались средства ограничения упругих перемещений ИТ, которые решают задачи снижения механических напряжений и отсутствия электрических контактов между электродами. Ряд вариантов средств ограничения перемещений был предложен и запатентован за рубежом, но, насколько известно, расположение упоров назначалось без обоснования, а серьезные анализ и расчеты эффективности не проводились.

Известны следующие ограничители-упоры перемещений: на основании (рис. 4, а) [4]; изгиба упругих элементов (рис. 4, б) [8]; амплитуды первичных колебаний (рис. 4, в) [9]. Ограничители-упоры первых двух групп, как правило, ограничивают как угловые, так и линейные перемещения ИТ, чтобы при больших перегрузках не происходило замыканий электрических контактов. Они могут быть выполнены в виде коротких штырей на статоре, входящих с гарантированными зазорами порядка несколько микрометров в прорези ИТ (рис. 4, а), а могут быть расположены вне ИТ (рис. 4, в). Такие упоры практически не ограничивают перемещения по оси X, но в режиме первичных угловых колебаний при сложении перемещений при этих колебаниях и поступательных перемещений при действии линейных ускорений вступают в силу ограничения, обусловленные возможностью соударений упоров с границами прорезей.

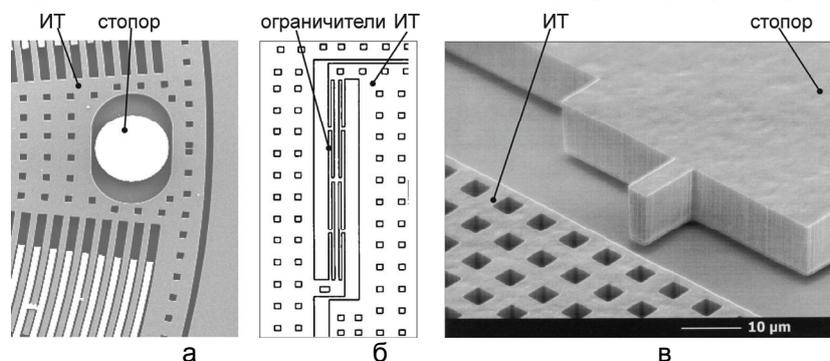


Рис. 4. Упоры на основании (а, в) и ограничители изгиба (б)

Наличие упоров, особенно ограничивающих перемещения ИТ перпендикулярно его плоскости, приводит к значительному изменению напряженного состояния конструкции упругого подвеса и ИТ при возникновении контакта. При отсутствии упоров контакт ИТ осуществляется по плоскости, при этом даже при очень больших перегрузках контактные напряжения малы, однако возможны замыкания электрических контактов. Если же контакт осуществляется только по дискретным точкам в местах расположения упоров, то ИТ подвергается изгибу. При этом определяющими становятся нормальные изгибные напряжения, и опасность разрушения при ударе может возрастать на порядки. Возможно также комбинированное напряженное состояние, при котором ИТ под действием сил инерции садится на упоры, но в то же время в промежутках между ними происходит контакт изогнутой поверхности ИТ с опорной плоскостью.

Обычно после посадки на упоры жесткость упругих элементов незначительна, однако, как правило, нужно учитывать деформации номинально плоской поверхности ИТ перед посадкой на упоры, вследствие чего касание упоров поверхностью ИТ происходит не одновременно, а при увеличении нагрузки со временем. При этом ИТ в целом должно рассматриваться как тонкая упругая пластина. При обычной сложной конфигурации ИТ и упругого подвеса необходимо использовать КЭА (рис. 5, а). Из результатов выборочных численных расчетов выясняется, что экстремальные упругие перемещения достигаются в зонах наибольшего удаления от упоров, а наибольшие изгибные напряжения – как правило, над упорами.

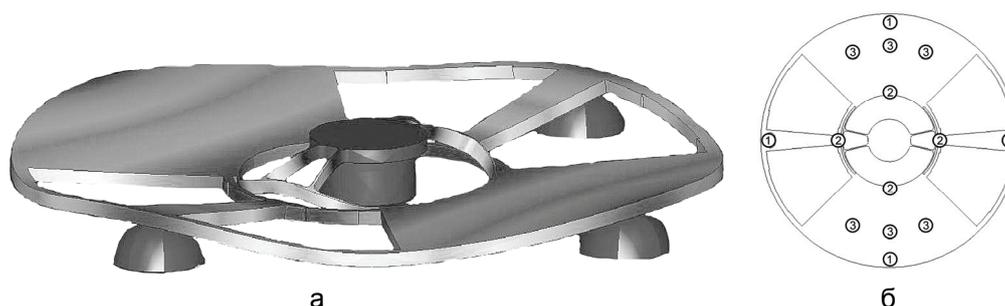


Рис. 5. Деформации ИТ и упругого подвеса при контакте с упорами (а) и варианты расположения упоров (б)

Для оценки эффективности установки упоров были рассмотрены три варианта их расположения (рис. 5, б): (1) четыре упора, равномерно расположенные по окружности на внешнем диаметре ИТ; (2) четыре упора, равномерно расположенные по окружности на внутреннем диаметре ИТ; (3) по три упора под каждым массивным сектором ИТ (вне зоны гребенчатого двигателя). Напряжения вычислялись в замкнутом контуре упругих элементов подвеса методом КЭА (рис. 6). Квазистатический анализ проводился при ускорении, действующем на ИТ, равном 10^3g .

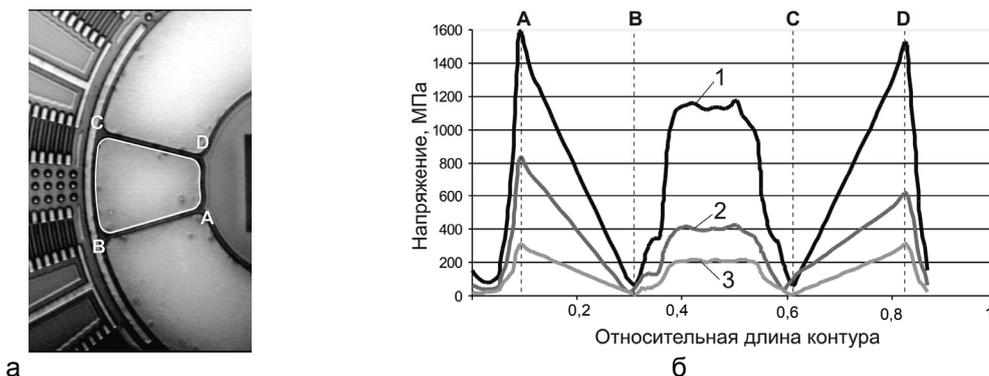


Рис. 6. Контур упругого подвеса (а) и напряжения в контуре (б)

Расчеты показывают, что напряжения в упругом подвесе сильно зависят от расположения упоров и путем удачной конфигурации могут быть снижены с 1600 МПа до 300 МПа. Как видно из рис. 6, б, только вариант (3) удовлетворяет требованию по допустимому напряжению в элементах подвеса $\sigma_{\text{доп}} = 500$ МПа.

Заключение

Контактные взаимодействия в ММГ возникают при значительных инерционных ударных нагрузках. При этом требуется обеспечение ударпрочности конструкции и сохранение метрологических характеристик прибора. На основании данных о собственных частотах конструкции ММГ и длительности ударных импульсов обоснована возможность использования квазистатического анализа ударных процессов. В результате исследований, проведенных методом КЭА, получены данные о механических напряжениях в конструкции при действии удара в плоскости ИТ и в направлении, перпендикулярном плоскости ИТ. По результатам расчетов показано, что элементы конструкции, такие как упругий подвес, зубья двигателя, способны выдерживать значительные перегрузки – до $10^5 g$. При этом можно сформулировать следующие рекомендации по выбору параметров конструкций ММГ, стойких к воздействию удара: повышение собственных частот конструкции и, следовательно, увеличение жесткости упругого подвеса и установка упоров – ограничителей перемещения элементов конструкции. Выявлено, что упоры, ограничивающие перемещения ИТ, при правильном их размещении позволяют повысить перегрузочную способность подвеса. Наиболее сложными представляются задачи расчета ударпрочности, когда возможны контакты в разных точках, и задачи расчета многоударных режимов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект 10-08-00153-а.

Литература

1. Habibi S. Gun Hard Inertial Measurement Unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor / Habibi S., Cooper S.J., Stauffer J.-M., Dutoit B. // Proceeding of Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION. – PLANS-2008. – 5–8 May 2008. – P. 232–237.
2. Гай Э. Наводящиеся снаряды с инерциальной навигационной системой на микромеханических датчиках, интегрированной с GPS // Гироскопия и навигация. – 1998. – № 3. – С. 72–81.
3. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: Учебное пособие. – Тула: Гриф и К., 2004. – 476 с.
4. Пешехонов В.Г. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» / Пешехонов В.Г. [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 29–31.
5. Евстифеев М.И. Анализ ударпрочности конструкций микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн, А.А. Унтилов, А.М. Чистяков // Навигация и управление движением. – Материалы 9 конференции молодых ученых. – 2008. – С. 289–295.
6. Евстифеев М.И. Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 3. – С. 22–34.
7. Евстифеев М.И. Проблемы расчета и проектирования микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2004. – № 1. – С. 27–39.
8. U.S. Patent 7204144. Micromachined Apparatus with Drive/Sensing Fingers in Coupling Levers / Geen J. ; Analog Devices, Inc. – Apr. 17, 2007. – 23 p.
9. Geiger W. A Mechanically Controlled Oscillator / Geiger W., Sandmaier Y., Lang W. // Sensor and Actuators. – 2000. – № 82. – P. 74–78.

Евстифеев Михаил Илларионович – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», доктор технических наук, доцент, начальник отдела, evstifeevm@mail.ru, office@eprib.ru
Розенцвейн Дмитрий Владимирович – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», научный сотрудник, Rosenzwein@mail.ru

УДК 536.24:519.9

**РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ
НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ**

Г.В. Бирюлин, В.И. Егоров, С.Ю. Муров

На основе метода конечных разностей разработан алгоритм расчета температур корпусов электронных компонентов, устанавливаемых на печатной плате. Проведено сравнение результатов расчетов аналогичной программой, реализующей аналитический метод.

Ключевые слова: электронная аппаратура, печатная плата, численное моделирование, метод конечных разностей, тепловой режим.

Введение

На стадии проектирования тепловой режим электронной аппаратуры определяется на основе метода поэтапного моделирования [1]. Наиболее часто применяются конструкции аппаратуры, печатные платы в которых расположены вертикально и параллельно друг другу, образуя вертикальные каналы для движения воздуха при принудительной и естественной вентиляции. Все печатные платы посредством коммутационных разъемов соединяются с вертикальной кроссплатой.

В соответствии с уровнями конструктивной иерархии используются тепловые модели различной степени детализации. Сначала рассчитываются ориентировочные средние температуры корпуса, нагретой зоны и воздуха внутри прибора. На следующем этапе совместно решаются задача определения в каждом канале скорости и температуры протекающего воздуха и задача расчета средних температур печатных плат. Результаты, полученные на этом этапе, служат исходными данными при расчете температур электронных компонентов (ЭК) на исследуемой печатной плате. Приведенная в [1] методика расчета температур (ЭК) содержит приближенные аналитические решения для промежуточных величин (тепловых коэффициентов и фоновых температур), что увеличивает погрешность результатов.

Методика расчета

Принимаем, что температура воздуха в каналах, между которыми расположена печатная плата, известна и изменяется линейно вдоль вертикальной координаты. Также известны среднеповерхностные температуры соседних плат, кроссплаты, корпуса РЭА и величины скоростей воздуха в каналах. Печатные платы и расположенные на них ЭК обмениваются лучистой энергией с соседними печатными платами и элементами конструкции. Охлаждение ЭК происходит также путем конвекции в воздушной среде в каналах между платами. Часть теплоты, выделяемой ЭК, нагревает печатную плату. Тепловое сопротивление между ЭК и печатной платой в зоне установки ЭК зависит от способа крепления. Теплопередача от печатной платы к кроссплате через электрические разъемы происходит кондуктивным путем.

Основные допущения тепловой модели:

- плата представляет собой анизотропную пластину, тепловое поле которой изменяется по двум координатам, перепадом по толщине пренебрегаем;
- коэффициент лучистого теплообмена на каждой из сторон платы определяется как средний по поверхности;
- коэффициент конвективного теплообмена от платы к воздуху в канале для вертикальных плат изменяется по высоте платы;
- температура любого ЭК есть среднеповерхностная температура его корпуса;
- тепловой поток от ЭК к плате равномерно распределен по площади его крепления;
- скорость воздуха в канале постоянна, а температура изменяется линейно от входа в канал до выхода.

При определении лучистых тепловых проводимостей [2] между корпусом ЭК и соседними платами, а также конвективных тепловых проводимостей между корпусом ЭК, платами и воздухом необходимо знать температуры этих объектов. Температуры корпусов ЭК являются искомыми, поэтому решение задачи возможно только итерационным методом [3, 4]. Теплота, выделяемая ЭК, уносится воздухом и лучистым потоком, а также передается другим ЭК посредством теплопроводности материала печатной платы. Поэтому для нахождения параметров тепловой связи между ЭК необходимо рассчитывать температурное поле печатной платы.

Для определения температурного поля печатной платы авторами, в отличие от [1], использован численный конечно-разностный метод [3]. Применена двухмерная равномерная прямоугольная сетка (рис. 1). Величины шагов сетки по оси x и по оси y могут отличаться. Количество узлов по вертикальной оси x обозначим M_X , по горизонтальной оси y – M_Y . Общее количество узлов (ячеек) сетки – M_C . Ячейка платы может иметь тепловую связь с корпусом ЭК. Для всех ячеек и ЭК составляют алгебраические уравнения на основе метода теплового баланса. Число алгебраических уравнений системы равно KY , где $KY=M_C+M_Э+M_P$, $M_Э$ – общее число ЭК, M_P – число разъемов. Для ячеек платы уравнения на основе метода теплового баланса, как показано в [3], являются конечно-разностными уравнениями.

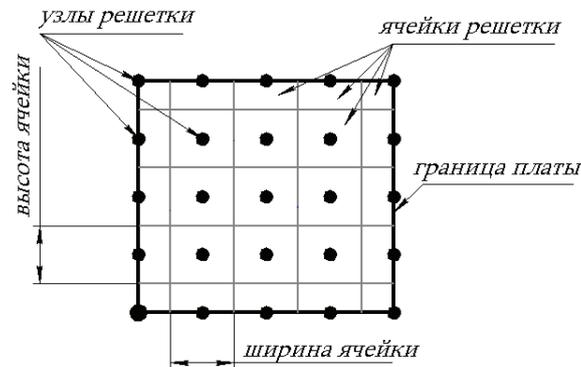


Рис. 1. Разбиение платы для метода конечных разностей

Для произвольно выбранной внутренней ячейки N (рис. 2) можем записать уравнение теплового баланса стационарного режима:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 = 0. \quad (1)$$

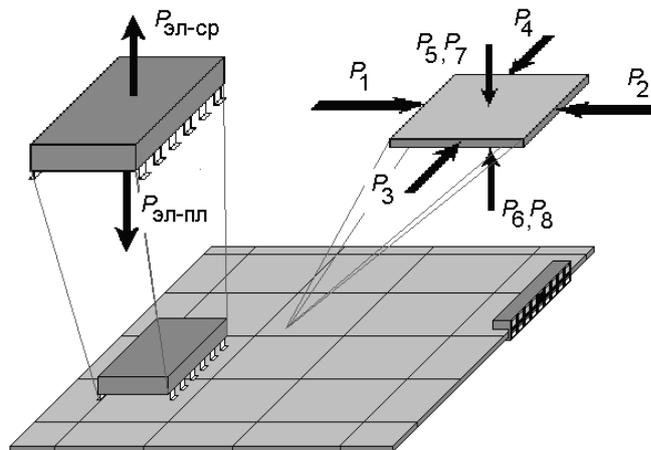


Рис. 2. Электронные компоненты (ЭК) и ячейки платы

Потоки, входящие в ячейку N от соседних ячеек за счет кондукции, определяются следующим образом:

$$P = \sigma_{\text{конд}} (T_1 - T_2); \quad (2)$$

$$P_1 = \lambda_x \cdot \delta \cdot \frac{ndx}{mdy} (T_{N-1} - T_N) - \text{поток через левую грань};$$

$$P_2 = \lambda_x \cdot \delta \cdot \frac{ndx}{mdy} (T_{N+1} - T_N) - \text{поток через правую грань};$$

$$P_3 = \lambda_y \cdot \delta \cdot \frac{mdx}{ndy} (T_{N-MY} - T_N) - \text{поток через верхнюю грань};$$

$$P_4 = \lambda_y \cdot \delta \cdot \frac{mdx}{ndy} (T_{N+MY} - T_N) - \text{поток через нижнюю грань};$$

$$P_5 = \sigma_{\text{пл-сп}}^n (T^n(x) - T_N) - \text{поток, входящий в ячейку } N \text{ от платы и воздуха на высоте } x \text{ слева};$$

$P_6 = \sigma_{пл-сп}^{np} (T^{np}(x) - T_N)$ – поток, входящий в ячейку N от платы и воздуха на высоте x справа;
 $P_7 = \sigma_{M1}^i (\bar{T}_{M1} - T_N)$ – поток, входящий в ячейку N от элемента $M1$, установленного на ячейке, с левой стороны;
 $P_8 = \sigma_{M2}^i (\bar{T}_{M2} - T_N)$ – поток, входящий в ячейку N от элемента $M2$, установленного на ячейке, с правой стороны.
 Здесь λ_x, λ_y – теплопроводности печатной платы в направлениях x и y (постоянные по всей площади платы); δ – толщина платы; ndx, mdy – размеры ячейки по x, y без учета крайних по положению ячеек; $\sigma_{пл-сп}^л, \sigma_{пл-сп}^{np}$ – тепловая проводимость от окружающей среды к ячейке с левой (правой) стороны; $\sigma_{M1}^i, \sigma_{M2}^i$ – тепловые проводимости от элемента, установленного на левой (правой) стороне к ячейке; $T^л(x), T^{np}(x)$ – условные температуры окружающей среды у поверхности платы на высоте расположения ячейки.

Для каждого ЭК (рис. 3) составим уравнение на основе закона сохранения энергии:

$$P = P_{эл-сп} + P_{эл-пл}, \quad (3)$$

где P – мощность тепловыделений элемента; $P_{эл-сп}$ – лучисто-конвективный поток, уходящий в окружающую среду (т.е. в воздушный канал конвективным путем, а в соседнюю плату и корпус – лучистым путем); $P_{эл-пл}$ – поток, уходящий в плату.

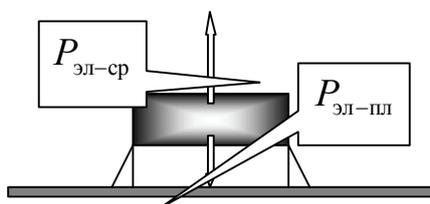


Рис. 3. Тепловой баланс электронного компонента

$$P_{эл-сп} = \sigma^л \cdot (T_M - \bar{T}^{пл}) + \sigma^к \cdot (T_M - \bar{T}^{возд}), \quad (4)$$

где $\bar{T}^{пл}, \bar{T}^{возд}$ – средняя температура соседней платы и воздуха в канале на данной высоте; $\sigma^л, \sigma^к$ – лучистая проводимость к соседней плате и конвективная к воздуху в канале на данной высоте.

Поток, уходящий в плату $P_{эл-пл}$, вычисляется как сумма потоков к каждой из ячеек платы, попадающих в проекцию элемента:

$$P_{эл-пл} = \sum \sigma_M^i \cdot (T_M - T_{N_i}). \quad (5)$$

Помимо ЭК, на печатной плате устанавливаются электрические разъемы. В работе [5] приведена методика расчета отвода теплоты в кроссплату.

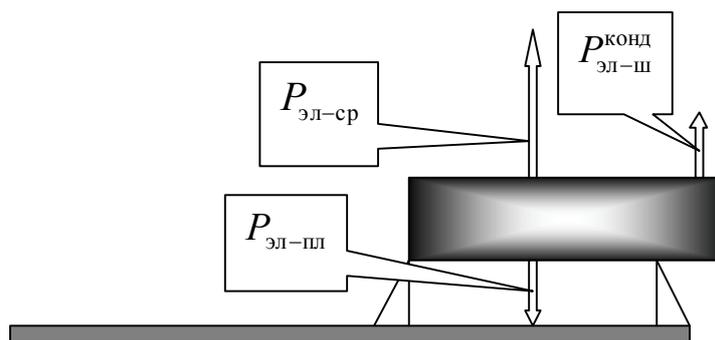


Рис. 4. Тепловой баланс разъема

Для каждого разъема (рис. 4) составим уравнение теплового баланса:

$$P = P_{эл-сп} + P_{эл-пл} + P_{эл-ш}^{конд}, \quad (6)$$

где $P_{эл-ш}^{конд}$ – поток, уходящий через разъем в кроссплату.

Баланс тепловых потоков составлен аналогично вышеизложенным принципам:

$$\sigma^л \cdot (T_M - \bar{T}^{пл}) + \sigma^к \cdot (T_M - \bar{T}^{возд}) + \sum \sigma_M^i \cdot (T_M - T_{N_i}) + \sigma_{эл-ш}^{конд} \cdot (T_M - T_{ш}) - P = 0.$$

Проводимость к кроссплате $\sigma_{\text{эл-ш}}^{\text{конд}}$ и температуру $T_{\text{ш}}$ в месте контакта определяют в зависимости от типа разъема. Для расчета конвективного коэффициента теплоотдачи от ЭК, установленного на плате, согласно [1], следует использовать зависимость для коэффициента Нуссельта в виде $Nu_l = 0,8\sqrt{Re_l}$, где l – характерный размер, определяемый как длина обтекания корпуса компонента.

Алгоритм и программа

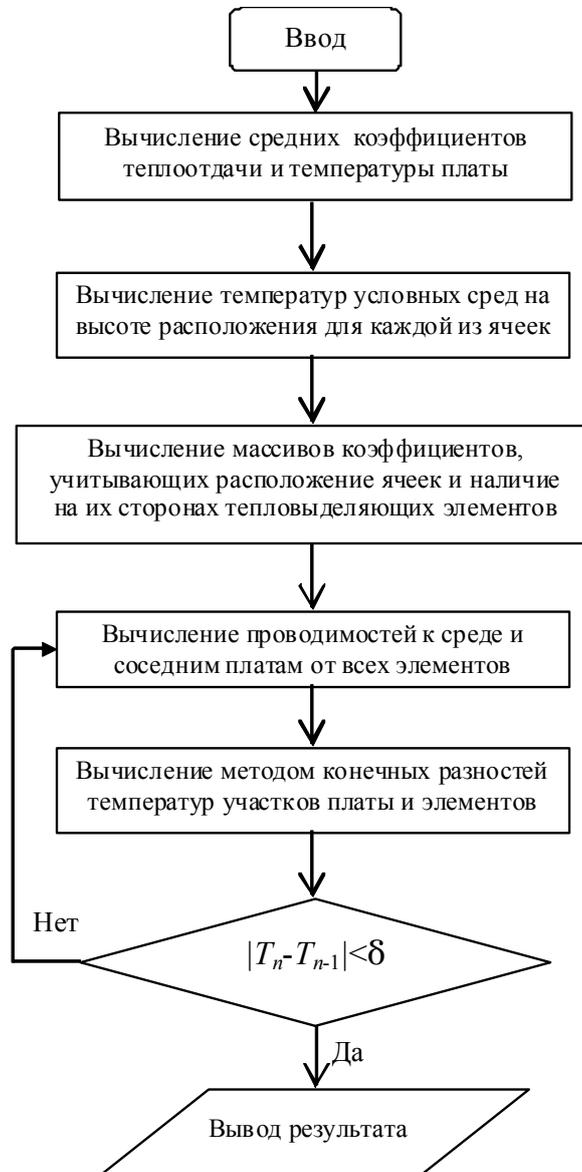


Рис. 5. Блок-схема алгоритма

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 5. Предлагаемый алгоритм был реализован на языке C++. Приведенный алгоритм, в отличие от алгоритма [1], не содержит вычислений плохо сходящихся рядов при расчетах тепловых коэффициентов и фоновых температур.

Для печатной платы с габаритами 250×250×1,5 мм и общей мощностью тепловыделяющих ЭК 11 Вт с девятью ЭК мощностью от 0,5 до 3,0 Вт при температуре корпуса 40°С проведено сравнение результатов расчета по разработанной программе (№ 1), по программе (№ 2), реализующей методику, предложенную в [1], и результатов эксперимента. В таблице представлены перегревы элементов над температурой корпуса прибора для трех наиболее нагретых ЭК.

Расчетные перегревы ЭК над температурой корпуса прибора выше экспериментальных на 3–8% по программе № 1 и на 7–14% по программе № 2.

№	Мощность, Вт	Контактное тепловое сопротивление ЭК, К/Вт	Перегревы ЭК над температурой корпуса прибора, К		
			Эксперимент	Программа №1	Программа №2
1	3	1,1	37,1	39,4	42,3
2	1	2,5	23,1	24,9	26,8
3	1,6	0,91	24,5	25,6	26,1

Таблица. Сравнение результатов расчетов и эксперимента

Заключение

Современные многослойные печатные платы имеют коэффициенты теплопроводности порядка 10 Вт/(м·К) [5]. При вариации величины теплопроводности от 7 Вт/(м·К) до 15 Вт/(м·К) для печатной платы с габаритами 230×160×1,5 мм относительный перегрев уменьшается в среднем на 25% для ЭК с тепловыделениями порядка 0,5 Вт и тепловым сопротивлением от корпуса ЭК к печатной плате порядка 2,5 К/Вт. Величина теплопроводности печатной платы на стадии проектирования может быть оценена с большой погрешностью. В проведенной серии расчетов выявлено существенное влияние величины теплопроводности печатной платы на тепловой режим ЭК. Применение программы позволит разработчикам аппаратуры определить диапазон изменения температур ЭК.

Изложенный алгоритм предназначен для использования в системах автоматизированного проектирования печатных плат.

Литература

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
2. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в РЭА. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
3. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. – М.: Высшая школа, 1990. – 208 с.
4. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров. – М.: Высшая школа, 1994. – 544 с.
5. Сушко В.Ю., Кораблев В.А., Шарков А.В. Методика расчета теплового сопротивления штыревых электрических разъемов // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 9. – С. 51–54.

- Бирюлин Гавриил Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, gavrila@bk.ru
- Егоров Владимир Иванович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, ktf@gv.ifmo.ru
- Муров Святослав Юрьевич** – ОАО «БНТ Прибой», инженер, ncdf@mail.ru

УДК: 548, 546.06

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЛЛАТОВ ЛАНТАНА МЕТОДОМ РЕНТГЕНФАЗОВОГО АНАЛИЗА

О.А. Пшенко, Л.А. Пьянкова

Исследован фазовый состав галлатов лантана (LaGaO_3) со структурой перовскита, допированных примесью Co^{3+} (до 10 вес. %), методом рентгенофазового анализа. Профильный анализ рентгенограмм показал, что с увеличением концентрации примеси кобальта в смешанных кристаллах $\text{LaGa}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ происходит незначительное искажение кубической кристаллической решетки с уменьшением параметра элементарной ячейки на 0,03 нм. Тем не менее, в галлатах лантана возможно локальное понижение симметрии, что проявляется на рентгенограммах в виде расщепления дифракционного максимума (211).

Ключевые слова: галлаты лантана, рентгенофазовый анализ, допированные полупроводники, перовскитные структуры, качественный анализ полупроводников.

Введение

Несмотря на широкий выбор полупроводниковых материалов, используемых в различных областях современной техники, создаются новые материалы, требующие тщательного изучения с целью разработки технологии их получения, включая очистку и допирование. Сложные оксиды со структурой перовскита представляют большой интерес как материалы для твердооксидных топливных элементов (solid oxide fuel cells – SOFC), кислородоотделительных мембран, мембранных реакторов селективного окисления, твердоэлектролитных кислородных насосов и сенсоров. Транспортные свойства (ионная и дырочная проводимость) этого оксида определяются катионами, занимающими позиции La и Ga в кристаллической решетке перовскита LaGaO_3 , а также внешними условиями (температура и парциальное давление кислорода). Эти свойства изменяются в широких пределах и могут быть управляемы за счет частичного замещения в обеих катионных подрешетках. Перспективным мембранным материалом с высокой смешанной проводимостью являются твердые растворы на основе LaGaO_3 [1–5].

Согласно работе [2], в системе $(1-x)\text{LaCoO}_3 - x\text{LaGaO}_3$ образуется непрерывный ряд твердых растворов состава $\text{LaGa}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$. Изменение степени замещения x ионов Ga^{3+} ионами Co^{3+} приводит к увеличению удельной электропроводности и ромбоэдрическому искажению структуры.

Цель данной работы – изучение степени влияния примеси Co^{3+} на параметры элементарной ячейки перовскита галлата лантана (LaGaO_3) путем сравнения профильных рентгенограмм недопированного («чистого») и допированных соединений.

Методика исследования

Объекты исследования представляли собой соединение LaGaO_3 со структурой кубического перовскита (рис. 1), допированное Co^{3+} (5, 7 и 10 вес. %). Образцы были получены по керамической технологии путем прокаливания на воздухе тонко растертой и спрессованной в таблетки смеси La_2O_3 и Ga_2O_3 при 1450°C в течение 50 часов. Гомогенность полученных твердых растворов контролировалась по критерию постоянства магнитной восприимчивости, достигавшегося оптимизацией времени прокаливания и состава газовой среды (воздух, O_2) [5].

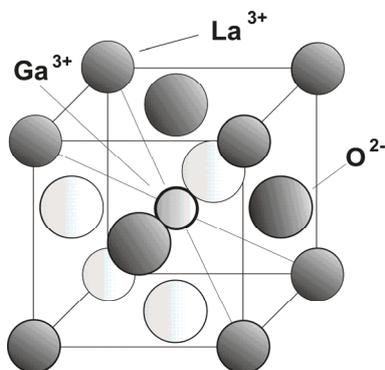


Рис. 1. Ячейка LaGaO_3 . Ионы галлия – в центре ячейки, ионы лантана – в вершинах ячейки, ионы кислорода – в центре граней

Рентгенофазовый анализ порошков поликристаллов проведен в СПбГУ ИТМО на настольном рентгеновском дифрактометре «ДИФРЕЙ» (производитель ЗАО «Научные приборы»). Условия съемки: анод рентгеновской трубки $\text{Cu}_{K\alpha}$ ($\lambda = 0,154051$ нм), напряжение 40 кВ, рентгенооптическая схема Брегга-Брентано, позиционно-чувствительный изогнутый детектор. Время съемки – 600 с. Для калибровки детектора использован внешний стандарт Al_2O_3 . Результаты измерений обрабатывались в программном комплексе Diffract.

Результаты исследований

Полученные рентгенограммы (рис. 2) смешанных соединений $\text{LaGa}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$, сравнивались между собой (профильный анализ) и с эталоном – «чистым» соединением LaGaO_3 (карточка ICSD #76047 в базе дифрактометрических данных). Рентгенограммы допированных соединений $\text{LaGa}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ во всем диапазоне исследуемых концентраций практически совпадают, т.е. изменение концентрации примеси кобальта (5, 7 и 10 вес.%) не приводит к заметным изменениям параметров кристаллической решетки.

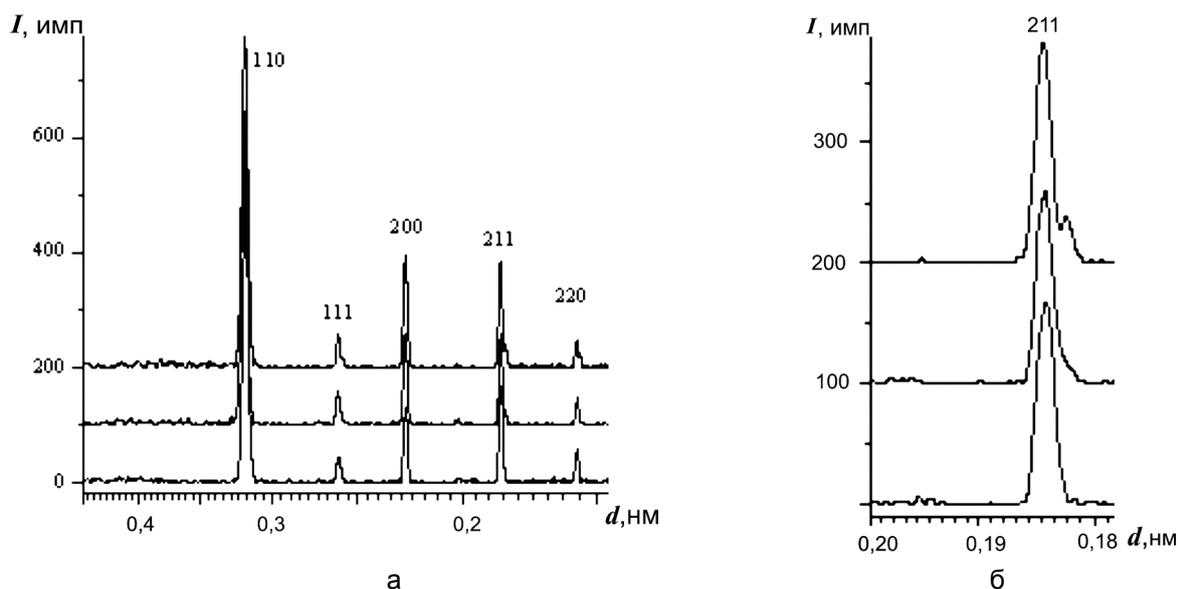


Рис. 2. а) Обзорные рентгенограммы («ДИФРЕЙ»): $\text{LaGa}_{0,95}\text{Co}_{0,05}\text{O}_3$ (нижний профиль), $\text{LaGa}_{0,93}\text{Co}_{0,07}\text{O}_3$ (средний профиль) и $\text{LaGa}_{0,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_3$ (верхний профиль); б) Фрагмент рентгенограммы (расщепление верхнего дифракционного максимума (211)). I , имп – количество импульсов, накопленных за 600 с, d , нм – межплоскостное расстояние

В табл. 1 приведены значения углов 2θ (θ – угол скольжения из формулы Вульфа-Брегга) и hkl (индексы Миллера) для эталона и допированных соединений $\text{LaGa}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$. Также представлены значения отклонения $\Delta 2\theta$ от эталона, σ (среднее квадратичное отклонение), и интенсивность характеристического излучения I (в % от максимального значения) при числе дифракционных максимумов $n = 6$. Погрешность величины изменения $\Delta 2\theta$ рассчитывалась по формуле $\Delta 2\theta = 2\theta_{\text{эт}} - 2\theta_x$, где $2\theta_{\text{эт}}$ – величина удвоенного угла скольжения эталона, $2\theta_x$ – величина удвоенного угла скольжения исследуемых образцов LaGaO_3 с примесями Co^{3+} .

LaGaO ₃ (эталон)			LaGa _{0,95} Co _{0,05} O ₃			LaGa _{0,93} Co _{0,07} O ₃			LaGa _{0,9} Co _{0,1} O ₃		
2θ, град	<i>hkl</i>		2θ, град	<i>I</i> , %	Δ2θ, град	2θ, град	<i>I</i> , %	Δ2θ, град	2θ, град	<i>I</i> , %	Δ2θ, град
1	32,560	(110)	32,69	100	-0,13	32,61	100	-0,05	32,62	100	-0,06
2	40,160	(111)	40,21	7	-0,05	40,12	10	0,04	40,11	11	0,05
3	46,713	(200)	46,71	22	0,003	46,67	34	0,043	46,64	29	0,073
4	58,097	(211)	58,15	28	-0,053	58,04	32	0,057	58,11	29	-0,013
5	68,203	(220)	68,73	9	-0,527	69,66	8	-1,457	69,73	9	-1,527
6	77,632	(310)	78,82	13	-1,188	78,78	9	-1,148	78,78	10	-1,148
σ						0,869			1,125		
<i>K</i> , %						71			64,5		

Таблица 1. Профильные параметры рентгенограмм

Из графика зависимости σ разности между углами скольжения эталона и исследуемых образцов от концентрации примеси (рис. 3, а) видно, что по мере увеличения содержания кобальта увеличивается разница между углами 2θ эталонного образца и исследуемых образцов. Сравнение исследуемых объектов с эталонным образцом методом весового корреляционного анализа [6] показало уменьшение коэффициента корреляции $K\%$ Пирсона с увеличением концентрации примеси в кристаллах (рис. 3, б).

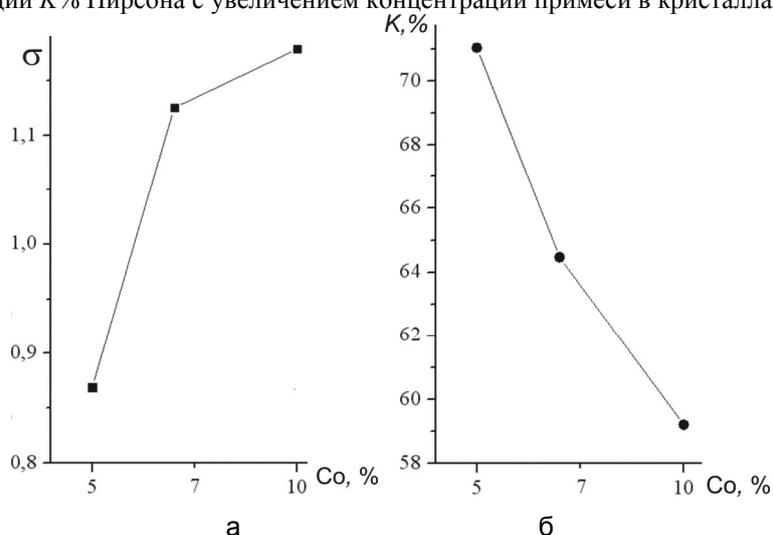


Рис. 3. Концентрационная зависимость (вес.% Co): а – σ (среднего квадратичного отклонения углов 2θ), б – коэффициента корреляции K профиля рентгенограмм образцов

Интенсивности отдельных дифракционных максимумов рентгенограмм исследуемых соединений (табл. 1) изменяются незначительно, т.е. текстура не проявляется, и, следовательно, изменения в кристаллической решетке происходят постепенно.

Несмотря на отсутствие скачков интенсивности, увеличение концентрации примеси Co^{3+} приводит к расщеплению дифракционного максимума (211) (рис. 2, б). Расщепление дифракционного максимума может быть связано со следующими причинами:

- образование самостоятельной фазы LaCoO_3 ;
- локальное искажение структуры, связанное с неравномерным вхождением примеси Co^{3+} в структуру галлата лантана;
- изменение химического состава поверхности образцов при хранении в воздушной атмосфере.

Результаты расчетов параметров элементарной ячейки перовскитоподобного соединения $\text{LaGaCo}_x\text{O}_3$ представлены в табл. 2. Основными параметрами элементарной ячейки кубического кристалла являются a – период решетки (длина ребра элементарной ячейки) и $V = a^3$ – объем элементарной ячейки:

$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2},$$

где d – межплоскостное расстояние, h, k, l – индексы Миллера. Для расчета параметров выбирались дифракционные максимумы (hkl) , имеющие симметричную форму и достаточную интенсивность: (110), (111), (200), (211), (220), (310). Из данных табл. 2 можно видеть, что в полупроводниках $\text{LaGa}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ уже при начальном пятипроцентном допировании Co^{3+} происходит уменьшение параметров элементарной ячейки на 0,03 нм.

Параметр	LaGaO_3 (эталон)	$\text{LaGa}_{0,95}\text{Co}_{0,05}\text{O}_3$	$\text{LaGa}_{0,93}\text{Co}_{0,07}\text{O}_3$	$\text{LaGa}_{0,9}\text{Co}_{0,1}\text{O}_3$
a , нм	0,3886	0,3857	0,3856	0,3854
V , нм ³	0,05868	0,05739	0,05733	0,05727

Таблица 2. Параметры элементарных ячеек исследуемых образцов

Выводы

Анализ рентгенограмм, проведенный в работе, показывает, что с увеличением концентрации примеси кобальта в галлате лантана $\text{LaGa}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ уменьшаются параметры элементарной ячейки. Такое изменение связано с различием размеров замещаемых ионов. Ион Ga^{3+} с координационным числом 6 в ячейке, имеющий радиус 0,076 нм, замещается ионом Co^{3+} (радиус иона 0,64 нм), что и приводит к уменьшению объема элементарной ячейки.

Полученная закономерность должна позволить определять концентрацию примеси кобальта в полупроводниках галлата лантана со структурой перовскита путем наложения спектров и сравнения их с эталонными профилями.

Проведенное исследование данных полупроводников выявило также, что допирование галлатов лантана кобальтом до 10 вес. % не приводит к существенному искажению кристаллической решетки кубической сингонии. Однако с увеличением концентрации Co^{3+} происходит постепенное расщепление пика (211), что может свидетельствовать о локальном понижении симметрии элементарной ячейки кристаллов $\text{LaGa}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ и служить критерием стабильности структурно-фазового состояния соединения.

Литература

1. Бледнов А.В. Получение и изучение смешанных проводников на основе галлата лантана как материалов для кислородных мембран // Тезисы III школы-конференции молодых ученых по химической синергетике. – 2006. – С.104.
2. Лубинский Н.Н., Башкиров Л.А., Петров Г.С., Кандидатова И.Н. Физико-химические свойства твердых растворов кобальтитов-галлатов лантана // Тезисы VIII Международной конференции «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии». – Кисловодск, 2008. – С. 458.
3. Бакланова И.В., Леонидов И.А., Переляева Л.А. Синтез и исследование твердых растворов на основе галлата лантана $(\text{La},\text{Sr})(\text{Ga},\text{Mg})\text{O}_{3-\delta}$ // Там же. – С. 510.
4. Данилов Ю.В. Электрические характеристики $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{Ga}_{0.85-x}\text{R}_{x}\text{Mg}_{0.15}\text{O}_{3-\delta}$ (R= Cr, Mn, Fe, Co, Ni) // Материалы конференции «Ломоносов-2008». Физическая химия. – М., 2008. – С. 607.
5. Чежина Н.В., Бодрицкая Э.В., Жук Н.А., Банников В.В., Шеин И.Р., Ивановский А.Л. Магнитные свойства и электронное строение перовскита LaGaO_3 допированного никелем // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – Вып. 11. – С. 2032.
6. Эсбенсен К. Анализ многомерных данных. – М.: РХО, 2010. – 157 с.

Пшечко Ольга Андреевна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, студент, Zubanova_OA@mail.ru

Пьянкова Любовь Алексеевна

– ЗАО «Научные приборы», методист, lyuba_pryan@mail.ru

УДК 537.533.35+537.534.35

ПРИМЕНЕНИЕ ИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ КАНАЛОВ МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ В СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖКАХ

А.А. Евстапов, И.С. Мухин, И.В. Кухтевич, А.С. Букатин

Исследованы режимы травления стекла марки К8, покрытого углеродной, золотой или хромовой пленками. Показано, что минимальный воспроизводимый размер микроканалов, который можно создать сфокусированным ионным пучком для выбранного материала, составляет 40 нм. Получены экспериментальные прототипы микрофлюидных чипов с системой наноканалов для фиксации и исследования биологических объектов.

Ключевые слова: микро- и наноструктуры, микрофлюидный чип, ионная литография, магнетронное напыление, электронная микроскопия, ионная микроскопия.

Введение

Микрофлюидные устройства находят широкое применение при обработке, подготовке проб и анализе жидких образцов в биологии, медицине и химии. Жидкостная хроматография, электрофорез, масс-спектрометрия в сочетании с микрофлюидными устройствами позволяют осуществлять анализ и идентификацию веществ с высокой чувствительностью [1]. Сокращение поперечного сечения микрофлюидных каналов к масштабу наноразмеров является привлекательным для обнаружения, транспортировки и сортировки отдельных биологических молекул, например ДНК. Кроме того, наноразмерные системы вызывают повышенный интерес в связи с их фундаментальным и прикладным значением в различных областях химии и физики. Однако высокая стоимость изготовления, дорогое оборудование и сложный процесс изготовления наноструктур препятствуют большому количеству исследований в этой области.

В настоящее время существует множество технологий получения наноканалов в различных материалах (полимерах, кремнии, стекле и др.). Наноканалы могут быть сформированы в специальных биосовместимых материалах, что позволяет успешно использовать такие системы в медицине [3]. Применение наноразмерных каналов и нанопор в микрофлюидных устройствах позволяет значительно улучшить

аналитические характеристики при разделении биологической пробы [4]. Нанофлюидные устройства используются для исследований конформационных, динамических и других свойств молекул ДНК в различных средах, для определения генетической информации по длине молекулы ДНК и т.д. [5].

Методы получения микро- и наноструктур в стеклянных подложках

Выбор метода формирования наноструктур в аналитическом микрочипе определяется требуемыми характеристиками и материалом подложки чипа. Наиболее отработанными методами для формирования микроструктур в кремниевых, кварцевых и стеклянных подложках являются фотолитография и кислотное травление. Для получения наноструктур или каналов с нанометровым разрешением используется фотолитография в ультрафиолетовой области спектра, причем чем меньше длина волны излучения, тем более высокое разрешение можно получить [6]. Методы оптической литографии неперестают развиваться, причем разработчики стремятся создать методы прямого формирования наноструктур, без применения шаблона. Экспериментально было показано, что воздействие фемтосекундного лазерного импульса на прозрачные диэлектрики приводит к нелинейным механизмам повреждения материала, позволяя удалять сверхмалые количества материала и формировать структуры с размерами меньшими, чем длина волны излучения лазера [7]. Методы наноимпринтовой литографии используются для создания системы наноканалов размерами до 10–50 нм [8].

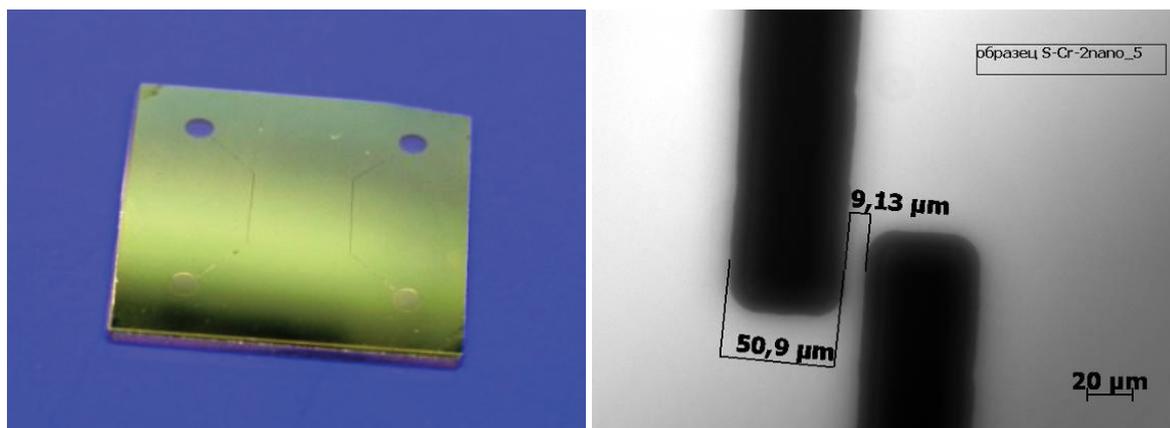
В то время как одиночные наноканалы и нанопоры позволяют изучать отдельные молекулы, множество параллельных наноструктур дает возможность оперировать с множеством молекул одновременно, получать более полную информацию об образце. Метод глубокого реактивного ионного травления (ГРИТ) – один из наиболее распространенных методов, позволяющий осуществлять серийное изготовление микроэлектромеханических устройств. С помощью этого метода можно достигнуть высоких аспектных соотношений (глубина : ширина) формируемых каналов – до 30:1 в кремниевых пластинах [9]. Существенным недостатком метода ГРИТ является необходимость применения агрессивных газовых смесей и достаточно высокая стоимость шаблонов.

Использование фокусированного ионного пучка (ФИП) в настоящее время распространено в микроэлектронной промышленности, например, при модификации и характеристике интегральных схем, исследовании материалов и т.д. Ионное травление используется как техника безмасочного производства микро- и наноструктур. Травление ионным пучком является востребованным из-за возможности применения в микро- и наноинженерии, а также возможности использования в электронной и ионной микроскопии как эффективного средства воздействия на материал [10]. Основной проблемой технологии ионного травления является сложность расчета параметров травления для достижения заданной геометрии формируемой поверхности. Особенностью ионного травления является то, что скорость травления материала выше скорости электронного травления, а минимально достижимый размер вытравливаемой области позволяет использовать эту технологию для микропроизводства с субмикронной точностью. Методы ФИП являются наиболее подходящими для прямого (безмасочного) формирования наноканалов для небольшой партии микрофлюидных чипов в лабораторных условиях.

В данной статье представлены результаты работ по формированию наноканалов в стеклянном микрофлюидном чипе методом ФИП.

Методы, оборудование и образцы

Для проведения экспериментов в работе применялась двухлучевая установка *CrossBeam Neon 1040* производства *Carl Zeiss* (Германия). В работе исследовались режимы травления стекла марки К8. Как известно, стекло является непроводящим материалом, что вызывает трудности при исследовании и модификации образцов с помощью сканирующей электронной и ионной микроскопий. Под действием пучка заряженных частиц на поверхности образца скапливается нескомпенсированный отрицательный или положительный заряд при облучении потоками электронов или ионов соответственно. Этот заряд влияет на исходный пучок, что делает невозможным фокусирование на субмикронных размерах. При облучении исследуемой части образца одновременно и ионным, и электронным пучками только часть заряда компенсируется противоположно заряженными частицами. Для решения проблемы с заряженной поверхностью образец стекла покрывался тонким слоем проводящего материала, повторяющим топологию поверхности исходного образца. На поверхности образца методом магнетронного напыления формировались золотые, углеродные и хромовые пленки. При этом использовалась установка магнетронного напыления *SPI Module Sputter/Carbon Coater* (Structure Probe, Inc. США). Толщина слоя золота составляла около 10 нм, углеродного покрытия – до 100 нм, хромового – до 140 нм. Эксперименты проводились с заготовками для микрофлюидных чипов из стекла К8 (с габаритами 24×24 мм, толщиной 2 мм), в которых методом фотолитографии и кислотного травления были сформированы микроканалы шириной 50 мкм и глубиной 12 мкм, подходящие друг к другу на расстояние около 9 мкм (рис. 1).



а б
Рис. 1. Заготовка для микрофлюидного чипа с микроканалами (а) и изображение подводящих микроканалов, между которыми формируются наноканалы (б)

Чтобы оценить количество удаляемого материала, часто используют эмпирические модели и оценки. Для кремниевых материалов используются выражения вида [10]

$$MRR = 0,61 - 6,032 \times 10^{-3} A + 0,02V + 2,25 \times 10^{-4} AV.$$

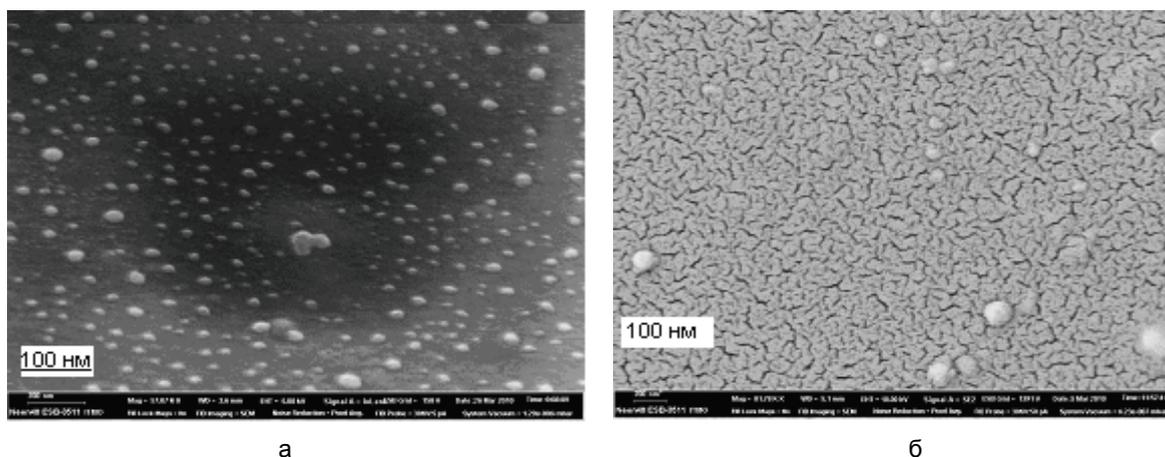
При использовании статистической модели

$$MRR = 0,74 - 0,78\delta + 0,043T_d - 0,28T_d^2,$$

где MRR – оценка удаляемого материала ($\text{мкм}^3/\text{с}$), A – размер апертуры (мкм), V – ускоряющее напряжение (кВ), T_d – время экспозиции (мкс), δ – размер пикселя (мкм). Хотя оба уравнения зависят от используемой установки, они дают вполне достоверные оценки при правильном выборе коэффициентов. Глубина травления также может быть выражена через получаемую плотность энергии (ионная плотность потока), время экспозиции и размер пикселя.

Экспериментальные исследования

На рис. 2 представлены изображения поверхности стекла, покрытого тонким слоем углерода (а) и золота (б), полученные на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) *CrossBeam Neon 1040*. В зависимости от условий осаждения можно подобрать режимы напыления сплошной пленки или пленки с островками размерами от 5 нм до 100 нм, как представлено на рис. 2, а. Мы считаем, что материал покрытия – золото, углерод или хром – несущественно влияет на процессы травления стекла из-за малой толщины. В работе исследованы режимы травления стекла К8 при разных ионных токах, а именно, 5 пА, 10 пА, 50 пА, 200 пА и 500 пА, и временах травления 10–200 с. Образец располагался на расстоянии 5 мм от ионной пушки. При больших токах размер сфокусированного ионного пучка превышает 1 мкм, следовательно, такой режим не может быть использован для создания субмикронных структур.



а б
Рис. 2. Изображения поверхности стекла, покрытого углеродной (а) и золотой (б) пленками (а и б – СЭМ CrossBeam Neon 1040)

Для изучения и выбора режимов травления материала формировались поры и каналы длиной 2 мкм и толщиной в 1 пиксел, что приблизительно соответствует диаметру ионного пучка. Созданные поры и каналы исследовались с помощью сканирующей электронной и ионной микроскопий.

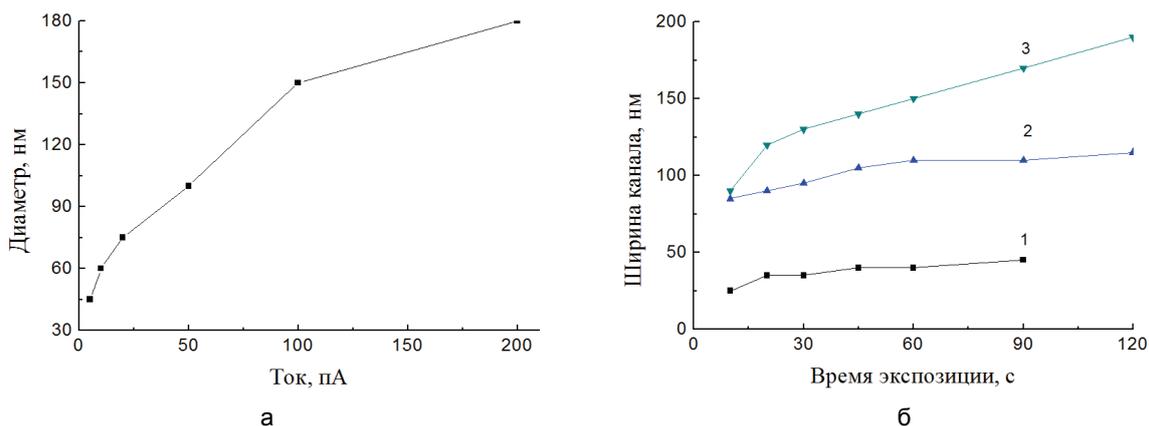


Рис. 3. а – зависимость диаметра поры от ионного тока при времени экспозиции 1 с, б – зависимость ширины канала от времени травления при ионном токе: 5 пА (1); 20 пА (2); 50 пА (3)

На рис. 3, а, представлена зависимость диаметра получаемой поры от ионного тока, которая достаточно хорошо аппроксимируется полиномом второй степени:

$$D = 42,945 + 1,422i - 0,0036i^2,$$

где D – диаметр получаемой поры, i – величина ионного тока. Хотя здесь нет параметра, связанного с временем травления, но, сняв несколько зависимостей для разных времен и определив рабочее время травления с удовлетворительной точностью, можно выбрать требуемый режим, вычислив величину требуемого тока для заданных размеров поры. Сложнее выбрать нужный режим в случае создания протяженных каналов. При этом требуется проведение тестовых травлений при разных режимах. На рис. 3, б, представлены результаты режимов травления канала длиной 2,2 мкм в стекле при разных ионных токах и временах экспозиции. При малых ионных токах наблюдается слабая зависимость изменения ширины канала от времени экспозиции, при изменении времени от 20 до 60 с ширина канала варьируется от 35 до 40 нм. При существенном увеличении ионного тока увеличивается размер ионного пятна, и, соответственно, увеличивается латеральный размер канала. При возрастании времени экспозиции также увеличиваются глубина канала и его ширина. Максимальная ширина канала может достигать нескольких микрометров. При больших глубинах канала начинает сказываться влияние процессов пересадки материала.

Измерения глубины канала после травления осуществлялись на сколе образца. Так как дно и стенки протравленного канала состоят из диэлектрика, то после травления проводилось покрытие поверхности токопроводящим материалом (золотом), а затем – измерения в электронном микроскопе. Профиль канала в первом приближении должен соответствовать профилю ионного пучка. На практике существует множество факторов, приводящих к искажению формируемой структуры. Поэтому важным является визуализация профиля и контроль характеристик канала. На рис. 4, а, представлено СЭМ изображение канала шириной 350 нм и глубиной свыше 2 мкм, протравленного током 100 пА в течение 150 с.

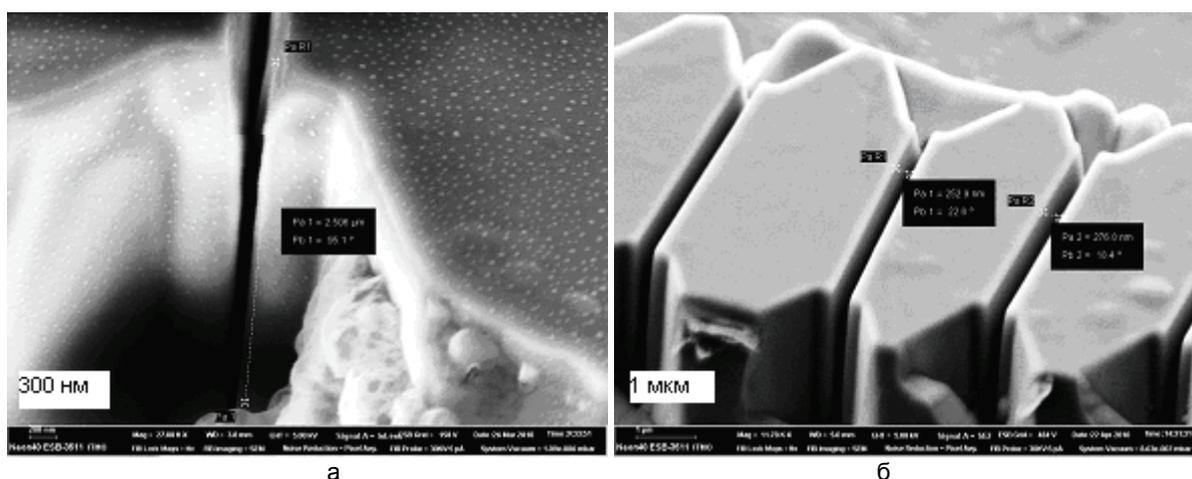


Рис. 4. Изображение канала, протравленного током 100 пА в течение 150 с (а). Изображение протравленных наноканалов с заходами между микроканалами (б) (СЭМ CrossBeam Neon 1040)

В данной работе был получен прототип микрофлюидного чипа с механической «ловушкой», выполненной в виде сети наноканалов, соединяющих два микроканала. Такая топология предполагает, что размер исследуемых биологических объектов находится в диапазоне от 0,5 до 5 мкм. В соответствии с

этой топологией были изготовлены образцы стеклянных пластин (рис. 1) с микроканалами. Между микроканалами методом ФИП были сформированы соединяющие наноканалы шириной около 250 нм с заходами. Изображение полученных наноканалов в микрофлюидном чипе представлено на рис. 4, б. Травление осуществлялось при ионном токе 200 пА. Время травления канала составляло 100 с, время травления заходов – 150 с. Из рисунка видно, что параллельные стороны трапеции захода составляют 0,5 мкм и 1,5 мкм, а глубина превышает 2 мкм. Время создания прототипа микрофлюидного чипа с 10 наноканалами составляет около 1 часа.

Заключение

В работе были исследованы режимы травления стекла марки К8, покрытого углеродной, золотой или хромовой пленками. Выявлено, что материал покрытия не оказывает существенного влияния на характеристики получаемых наноструктур. Изучены зависимости ширины канала от времени экспозиции при разных величинах ионного тока. Показано, что минимальный воспроизводимый размер микроканалов, который можно создать сфокусированным ионным пучком для данного материала, составляет 40 нм. Созданы экспериментальные прототипы микрофлюидных чипов для фиксации и исследования биологических объектов в их нативном состоянии. Такие микрочипы в дальнейшем могут использоваться как основа для создания новых аналитических приборов для современных систем медицинской диагностики и бионанотехнологии.

Исследования проведены в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы», проект «Исследования и диагностика клеточных структур: новые методические подходы и инструментальные решения на основе сканирующей зондовой микроскопии и микрочиповых технологий» (№ 4247) и в рамках Программы поддержки научно-исследовательской работы молодых ученых вузов России по гранту Carl Zeiss.

Литература

1. Mark D., Haeberle S., Roth G., von Stetten F. Roland Zengerle Microfluidic. Lab-on-a-chip platforms: requirements, characteristics and applications // Chem. Soc. Rev. – 2010. – V. 39. – P. 1153–1182.
2. Aigars Piruska, Maojun Gong, J.V. Sweedler and P.W. Bohn. Nanofluidics in chemical analysis // Chem. Soc. Rev. – 2010. – V. 39. – P.1060–1072.
3. Zenglian Yue, Guoqing Zhao, Bin Peng, Shasheng Huang. Nanochannel and its application in analytical chemistry // Recent Advances In Biology And Biomedicine. Puerto De La Cruz, Tenerife, Canary Islands, Spain. – 2009. – P. 80–93.
4. Noritada Kaji, Yukihiro Okamoto, Manabu Tokeshi and Yoshinobu Baba. Nanopillar, nanoball, and nanofibers for highly efficient analysis of biomolecules // Chem. Soc. Rev. – 2010. – V. 39. – P. 948–956.
5. Stephen L. Levy and Harold G. Craighead. DNA manipulation, sorting, and mapping in nanofluidic systems // Chem. Soc. Rev. – 2010. – V. 39. – P. 1133–1152.
6. Hoang H.T., Segers-Nolten I.M., Berenschot J.W., de Boer M.J., Tas N.R., Haneveld J., Elwenspoek M.C. Fabrication and interfacing of nanochannel devices for single-molecule studies // J. Micromech. Microeng. – 2009. – V. 19. – P. 065017 (10 pp).
7. Jeffrey F. Herbstman and Alan J. Hunt Single femtosecond pulse nanochannel formation in glass // Proc. SPIE. – 2010. – V. 7585. – P. 75850X.
8. Han Cao, Zhaoning Yu, Jian Wang, J.O. Tegenfeldt, R.H. Austin, Erli Chen, Wei Wu, S.Y. Chou Fabrication of 10 nm enclosed nanofluidic channels // Appl. Phys. Lett. – 1 July 2002. – V. 81. – № 1. –P. 174–176.
9. Abdolvand R., Ayazi F. An advanced reactive ion etching process for very high aspect-ratio sub-micron wide trenches in silicon // Sensors and Actuators. – 2008. – V. A 144. – P. 109–116.
10. Mohammad Yeakub Ali, Wayne Hung and Fu Yongqi A Review of Focused Ion Beam Sputtering // Int. J. of Precision Engineering And Manufacturing. – 2010. – V. 11. – № 1. – P. 157–170.

Евстапов Анатолий Александрович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, apevs@yandex.ru
Мухин Иван Сергеевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, imukhin@yandex.ru
Кухтевич Игорь Владимирович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ba@inbox.ru
Букатин Антон Сергеевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, antbuk.fiztek@gmail.com

УДК 53.084.2

ЗОНД ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ ТОКОВ ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

А.О. Голубок, В.В. Левичев, В.Н. Матыжонок, А.В. Стовяга

Создан пьезорезонансный датчик с микрозондом на основе стеклянной пипетки для сканирующей микроскопии токов ионной проводимости. Измерена резонансная частота и добротность датчика в воздушной и жидкой средах. Для улучшения латерального разрешения микрозонда на торце пипетки с помощью фокусированного ионного пучка сформирован нановыступ. С использованием тестовой решетки продемонстрировано пространственное разрешение микрозонда с нановыступом. Сделан вывод о возможности использования микрозонда в жидкой среде с одновременной работой в полуконтактной силовой моде и в моде измерения ионных токов.

Ключевые слова: сканирующая микроскопия токов ионной проводимости, микропипетка.

Введение

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одним из основных инструментов нанотехнологий. С помощью СЗМ решают разнообразные задачи, связанные с исследованием и модификацией объектов различной природы как в вакууме, так и в газообразных и жидких средах. Широкий спектр задач обуславливает возникновение различных методик, учитывающих специфику природы исследуемых образцов и окружающей среды. Для исследования с субмикронным разрешением мягких материалов, находящихся в растворе электролита, была разработана методика, получившая название сканирующей микроскопии токов ионной проводимости (СМТИП) [1]. С помощью методики СМТИП получают карту ионных токов, протекающих над поверхностью образца, используя стеклянную микропипетку в качестве зонда. СМТИП позволяет визуализировать мягкие биологические объекты, функционирующие в жидкой среде с ионной проводимостью, а также поры в искусственных мембранах. Используя СМТИП, можно получить детальную информацию о 3D структуре образца и важные данные о функционировании биологических клеток [2]. Изучение кинетики и пространственного распределения ионных токов в клеточных мембранах дает возможность регистрировать биологические процессы в реальном времени. Исследование потока ионов, проходящих через поры в искусственных мембранах, позволяет получить экспериментальные данные, необходимые для создания технологий электрохимических топливных элементов и диализа.

Целью данной работы явилось создание и исследование зонда для СМТИП, позволяющего измерять ионные токи с одновременной визуализацией поверхности в полуконтактной силовой моде. Для улучшения пространственного разрешения зонда в полуконтактной силовой моде была поставлена задача формирования на торце стеклянной микропипетки с помощью технологии фокусированного ионного пучка (ФИП) острия с нанометровыми размерами. В настоящее время технология ФИП широко используется для микро- и наномодификации различных материалов. Обычно для этой цели используются сфокусированные в тонкий пучок ионы галлия. Визуализация процесса обработки наноострия возможна за счет одновременного сканирования области обработки электронным пучком. Такая технология реализуется в двухлучевом микроскопе-литографе «Zeiss Crossbeam 1540 XB», использованном в данной работе.

Принцип работы СМТИП

Принцип работы СМТИП показан на рис. 1 [3].

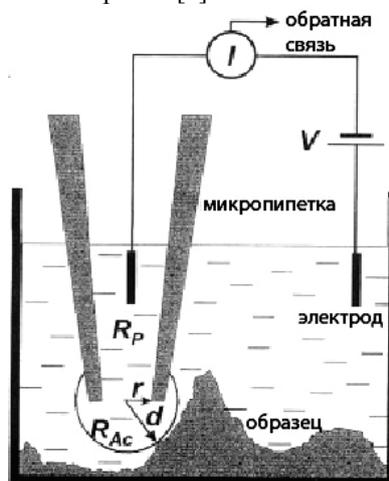


Рис. 1. Схема работы сканирующего микроскопа токов ионной проводимости

Зондовый датчик для СМТИП представляет собой микропипетку, заполненную электролитом. Микропипетка помещается над поверхностью не проводящего ионный ток образца, погруженного в раствор электролита. В качестве электролита может выступать физиологический раствор, в котором функционируют биологические клетки. При приближении кончика микропипетки к поверхности образца ток уменьшается вследствие уменьшения зазора между пипеткой и образцом, через который протекают ионы. Ионный ток измеряется усилителем и используется в качестве сигнала обратной связи для следящей системы автоматического управления перемещением сканера в направлении, перпендикулярном к поверхности образца. С помощью отрицательной обратной связи поддерживается постоянное расстояние между вершиной микропипетки и исследуемым образцом.

Эксперимент

Конструкция датчика для сканирующего зондового микроскопа представляет собой модификацию пьезорезонансного датчика силового взаимодействия [4]. К свободному концу пьезотрубки приклеена стеклянная микропипетка [5]. Для создания микропипеток использовались стеклянные капилляры из боросиликатного стекла с внутренним диаметром 0,4 мм и внешним диаметром 1,2 мм. Вытяжка капилляров проводилась на лазерной установке, представленной на рис. 2.

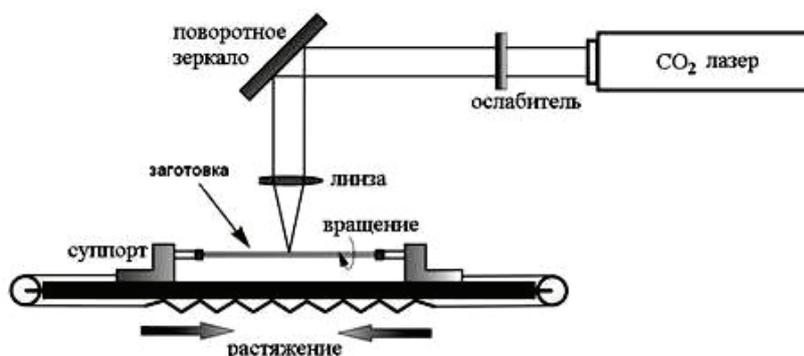


Рис. 2. Схема установки для лазерной вытяжки микрозондов

В данной схеме использовался CO₂ лазер с поперечным разрядом. Расходимость лазерного излучения составила 4 мрад при диаметре пучка 6 мм, мощность излучения – до 20 Вт. Излучение лазера поворотным зеркалом направляется на установку, проходит ZnSe линзу с просветляющим покрытием (фокусное расстояние 75 мм) и падает на заготовку. Линза имеет возможность перемещаться вдоль оптической оси, поэтому заготовка может обрабатываться как в фокусе лазерного пучка, так и за ним. Часть лазерного излучения поглощается, в результате чего температура небольшой зоны заготовки увеличивается и происходит постепенное расплавление зоны воздействия. Для обеспечения равномерности прогрева заготовки к захватам суппортов подводится вращающий момент от электродвигателя. Скорость вращения двигателя, а, следовательно, и заготовки, можно регулировать в диапазоне скоростей от 0 до 10 оборотов/с. К концам заготовки прикладывается растягивающее механическое усилие, что приводит к образованию зондов в результате разрыва заготовки в точке воздействия лазерного излучения.

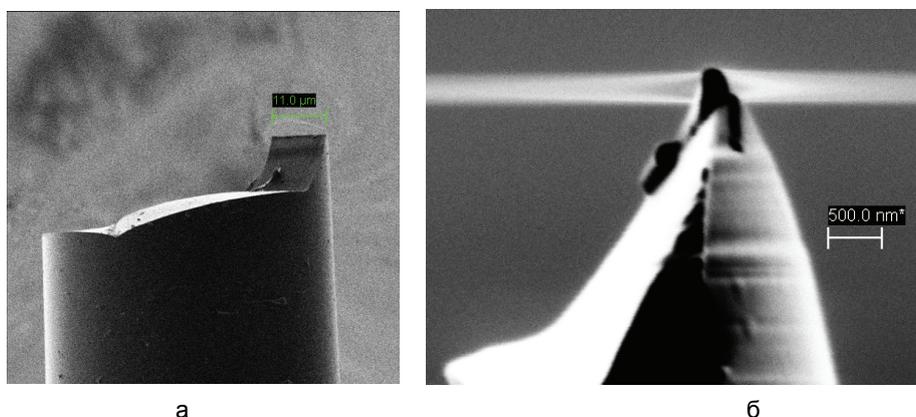


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения (двухлучевой микроскоп-литограф «Zeiss Crossbeam 1540 XB»): а – исходное острие микропипетки (ширина выступа ~110 мкм), б – формирование нановыступа (ширина ~200 нм) с помощью ФИП, горизонтально пересекающего верхнюю часть изображения

Исходная микропипетка, полученная с помощью технологии лазерной вытяжки, имела плоский торец с достаточно большим диаметром – около 11 мкм (рис. 3, а). В результате ионной обработки по технологии ФИП (30 кВ, 300 пА) на торце микропипетки формировался выступ с шириной менее 200 нм (рис. 3, б).

Результаты и обсуждение

Тестирование зонда проводилось в СЗМ «NanoEducator». Резонансные кривые имели вид, аналогичный кривым, полученным нами ранее [5], и имели резонансную частоту в диапазоне 4,9–7 кГц при добротности $Q=20,6–26,0$.

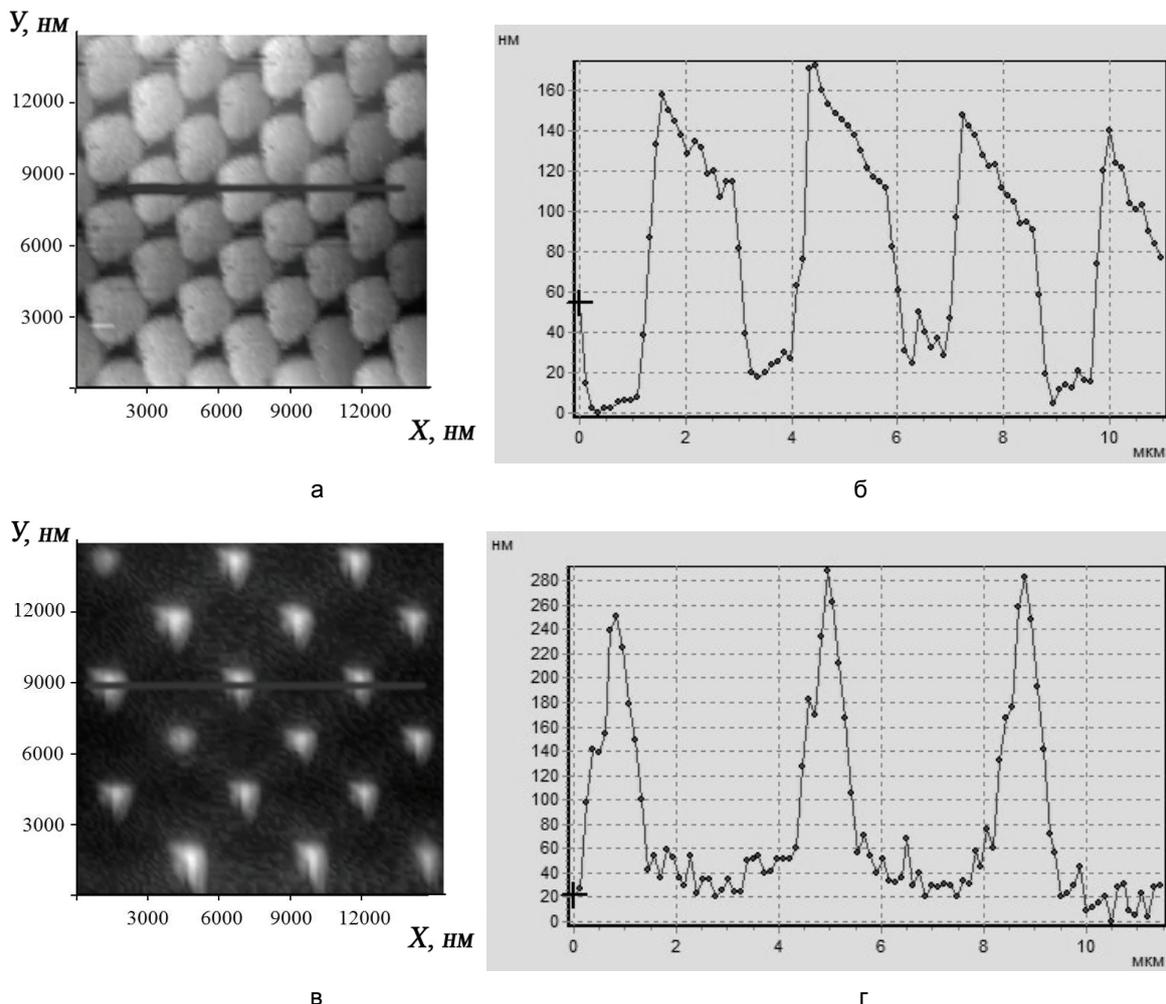


Рис. 4. СЗМ-изображения (СЗМ «NanoEducator») тестовой решетки TGT и их поперечные сечения, полученные в полуконтактной силовой моде: а, б – зонд в виде микропипетки после лазерной вытяжки; в, г – зонд в виде микропипетки с нановыступом

На рис. 4 представлены СЗМ-изображения тестовых решеток и их поперечные сечения, полученные в СЗМ «NanoEducator» в полуконтактной силовой моде с использованием микропипетки с плоской вершиной (11 мкм) (рис. 4, а, б) и микропипеткой с нановыступом, полученный с помощью технологии ФИП (рис. 4, в, г). Сравнение этих изображений, а также их поперечных сечений показывает, что на рис. 4, в, и 4, г, наблюдается значительное улучшение пространственного разрешения. Вместе с тем пространственное разрешение, достигнутое на рис. 4, а, и 4, б, значительно лучше того, которое можно было бы ожидать от применения зонда с внешним диаметром около 11 мкм. Наблюдаемое в эксперименте пространственное разрешение можно связать с присутствием на торце микропипетки острого выступа с характерным размером значительно меньше 11 мкм, который случайно образовался в процессе лазерной вытяжки.

Заключение

Таким образом, применение технологии ФИП позволяет контролируемым образом создавать нановыступ на торце микропипетки, используемой в качестве зонда в СМТИП.

Исследование зонда с помощью тестовой решетки показало, что он обеспечивает пространственное разрешение, аналогичное пространственному разрешению, достигаемому в полуконтактной силовой моде при использовании стандартного вольфрамового зонда, заостренного методом электрохимического травления. Добротность пьезорезонансного датчика со стеклянной микропипеткой близка к добротности датчика с вольфрамовым зондом. Жидкая среда не уменьшает добротность датчика по сравнению с добротностью, получаемой в воздушной среде.

На основании приведенных результатов исследования можно сделать вывод о возможности применения пьезорезонансного датчика с зондом-микропипеткой для измерения пространственного распределения токов ионной проводимости вблизи поверхности образца, находящегося в жидкой проводящей среде, с одновременной визуализацией поверхности в полуконтактной силовой моде с высоким пространственным разрешением.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки № 2.1.2/4187 «Многофункциональные нанозонды для сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии (СЗМ-С-Л): концепция, технология, характеристика, применение». Исследования выполнены в НОЦ-ИТ СПбГУ ИТМО на двухлучевом микроскопе-литографе «Zeiss Crossbeam 1540 XB».

Литература

1. Ying L., Bruckbauer A., Zhou D., Gorelik J., Shevchuk A. // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2005. – № 7. – P. 2859–2866.
2. Bruckbauer A., Ying L., Rothery A., Zhou D., Shevchuk. A. // Journal AM. CHEM. SOC. – 2002. – № 124. – P. 8810–8812.
3. Shevchuk A. et al., Simultaneous Measurement of Ca²⁺ and Cellular Dynamics: combined Scanning Ion Conductance and Optical Microscopy to Study Contracting Cardiac Myocytes // Biophysical Journal. – 2001. – V. 81. – P. 1759–1764.
4. Голубок А.О., Васильев А.А., Кerpелева С.Ю., Котов В.В., Сапожников И.Д., Датчик локального силового и туннельного взаимодействия в сканирующем зондовом микроскопе // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15. – № 1. – С. 62–69.
5. Голубок А.О., Левичев В.В., Пинаев А.Л., Стовпяга А.В., Исследование пьезорезонансного датчика локального силового взаимодействия сканирующего зондового микроскопа с зондом в виде микропипетки // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 3(61). – С. 59–62.

- Голубок Александр Олегович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, зав. кафедрой, golubok@ntspb.ru
- Левичев Вадим Вячеславович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, преподаватель, levichev_vadim@mail.ru
- Матыжонков Виктор Николаевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, victoor@yandex.ru
- Стовпяга Александр Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sanja100v@mail.ru

УДК 53.084.2

МИКРО- И НАНОМОДИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ НА ПОЛИМЕРНОЙ ПОДЛОЖКЕ В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ ЛИТОГРАФИИ

А.Л. Пинаев, А.О. Голубок

Методом динамической силовой литографии (ДСЛ) модифицирована поверхность золотой пленки толщиной 20 нм, нанесенной на подложку из поликарбоната. Получено пространственное разрешение около 100 нм. Показано, что пространственное разрешение метода определяется радиусом используемых зондов. Определен оптимальный режим, при котором вольфрамовый зонд полностью прорезает металлическую пленку. Обсуждаются факторы, влияющие на процесс модификации поверхности методом ДСЛ. Создана двумерная дифракционная решетка с периодом около 500 нм. Структура решетки исследована с помощью сканирующей полуконтактной силовой микроскопии, сканирующей и оптической конфокальной микроскопии. Сделан вывод о возможности создания элементов наноэлектроники, нанофотоники и наносенсорики в металл-полимерных системах методом ДСЛ.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, литография, динамическая силовая литография.

Введение

В современных нанотехнологиях применяются различные способы наномодификации поверхности материала. Наиболее широко распространены так называемые «пучковые» методы литографии, ос-

нованные на взаимодействии с веществом жестких ультрафиолетовых или рентгеновских фотонов, электронов или ионов [1]. Несмотря на широкую распространенность, эти методы обладают рядом недостатков. Например, для фотолитографии необходимо использовать заранее изготовленные фотошаблоны, наносить фоторезист, использовать химическое травление, приводящее к загрязнению поверхности. Модификация поверхности с использованием электронных или ионных пучков, в отличие от фотолитографии, может осуществляться более локально, однако ее использование осложняется трудностью контроля получаемой поверхности по глубине и дороговизной оборудования.

Альтернативой «пучковым» методам являются «зондовые» методы, основанные на использовании процесса сканирующей зондовой литографии (СЗЛ), реализуемого с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ), когда наномодификация поверхности осуществляется острым твердотельным зондом СЗМ [2]. При СЗЛ в области наноконтакта происходит концентрация токов большой плотности, высоких электрических полей и механических давлений. В этих условиях активизируется целый ряд явлений, таких как локальный разогрев, пластическая деформация, поляризация, полевое испарение, массоперенос за счет ионных токов в электролите и электрохимические реакции, в том числе реакции окисления. Раздельное или совместное действие этих факторов используется для наномодификации материалов в различных режимах СЗЛ.

Разновидностью СЗЛ является метод динамической силовой литографии (ДСЛ). При ДСЛ осуществляется механический динамический контакт (удар) между зондом и образцом, приводящий к пластической деформации образца. При этом необходимо, чтобы давление в области наноконтакта превосходило предел пластической деформации образца, но было бы меньше, чем предел пластической деформации зонда. Преимуществами метода ДСЛ являются его чистота (отсутствие резиста и химических реактивов), высокая локальность, простота и относительная дешевизна. К недостаткам ДСЛ следует отнести низкую скорость процесса литографии и ограниченную область решаемых задач. Тем не менее, метод ДСЛ представляет интерес для создания элементов нанoeлектроники, нанофотоники, наносенсорики, обеспечивая микро- и наномодификацию тонких проводящих, полупроводниковых и диэлектрических пленок. Целью данной работы является исследование режима ДСЛ применительно к тонким металлическим пленкам.

Постановка задачи

Метод ДСЛ легко реализуется на недорогих, но эффективных СЗМ «NanoEducator», выпускаемых ЗАО «Нанотехнологии-МДТ», использующих пьезорезонансные датчики силового взаимодействия [3]. Ранее нами показано, что ДСЛ с использованием вольфрамовых нанозондов хорошо работает на поверхности полимеров, таких, например, как поликарбонат [4]. В данной работе мы исследовали модификацию методом ДСЛ тонких металлических пленок, нанесенных на поверхность поликарбоната. Обычно металлические пленки напыляют на твердые подложки, такие, например, как кремний или сапфир. При этом в процессе ДСЛ, особенно при определении оптимальных режимов, возможно затупление (увеличение площади контакта) или разрушение зонда. Для исключения этой проблемы была выбрана система «металл – полимер».

Методика ДСЛ

Суть метода ДСЛ состоит в следующем. Создается цифровой рисунок-шаблон, прообраз будущей структуры, в котором определены координаты X, Y и величина модифицирующего силового воздействия. В полуконтактном силовом режиме осуществляется сканирование зондом поверхности образца. На прямом ходе сканирования в заданных шаблоном точках производится локальное силовое воздействие на поверхность объекта путем подачи на пьезосканер импульса управляющего напряжения, приводящего к перемещению образца вдоль координаты Z по направлению к зонду. Значения амплитуды и длительности управляющих импульсов подбираются такими, чтобы система обратной связи не успевала компенсировать вертикальное перемещение образца по направлению к зонду.

Для реализации оптимального динамического контакта, при котором произойдет «прокалывание» металлической пленки вольфрамовым зондом, необходимо выполнить ряд условий. С одной стороны, время быстроедействия следящей системы (СС) $\tau_1 \sim 1/f_1$ (где f_1 – частота среза следящей системы, определяемая суммарным коэффициентом усиления разорванной петли обратной связи), должно быть больше длительности управляющего импульса τ_2 , которая, в свою очередь, определяет время, затрачиваемое на перемещение образца по направлению к зонду:

$$\tau_1 > \tau_2.$$

При этом условии СС не успеет скомпенсировать уменьшение зазора между зондом и образцом, и произойдет динамический контакт образца с зондом, если

$$l(\tau_2) > L,$$

где $l(\tau_2)$ – смещение сканера под действием управляющего импульса напряжения с длительностью τ_2 , амплитудой U и коротким фронтом, L – амплитуда колебаний зонда на резонансной частоте датчика. С другой стороны, длительность управляющего импульса τ_2 не может быть слишком малой. Действительно, сканер, обеспечивающий перемещение образца вдоль координаты Z , имеет, как и любая механическая система, собственную резонансную частоту f_2 . Тогда для оценки величины смещения сканера под действием управляющего импульса можно использовать выражение

$$l(\tau_2) \sim \alpha U [1 - \exp(-\tau_2 \cdot f_2)],$$

где α – чувствительность сканера. При длительности управляющего импульса $\tau_2 < 1/f_2$ перемещение сканера будет малым, $l(\tau_2) \sim \alpha U (\tau_2 \cdot f_2)$ по сравнению с перемещением $l = \alpha U$, возникающим под действием управляющего импульса с большой длительностью $\tau_2 > 1/f_2$. В результате, при малых перемещениях сканера $l(\tau_2) < L$ и малой длительности управляющего импульса по сравнению с периодом колебаний зонда $\tau_2 < \tau_3$ (где $\tau_3 = 1/f_3$ – период колебаний зонда, f_3 – частота колебаний зонда, определяемая резонансной частотой датчика), столкновения образца с зондом может вообще не произойти. Иными словами, при слишком малых длительностях управляющего импульса перемещение сканера может оказаться меньше амплитуды колебаний зонда, а время перемещения – меньше периода его колебаний. При этом вследствие отсутствия синхронизации между смещением образца и колебаниями зонда может вовсе не произойти динамического контакта между зондом и образцом.

Тогда условия осуществления динамического контакта зонда с образцом имеют вид

$$1/f_1 > \tau_2 > 1/f_2$$

и

$$\tau_2 > \tau_3,$$

при этом величина перемещения сканера с образцом по направлению к зонду $l(\tau_2) \approx \alpha U$ может быть меньше амплитуды колебаний зонда:

$$l(\tau_2) < L.$$

Величины f_2 и f_3 жестко заданы и определяются конструкцией сканера (с учетом веса образца) и конструкцией датчика, а величина f_1 может изменяться путем изменения суммарного коэффициента электронного усиления разорванной петли обратной связи.

Отметим, что при малом значении f_1 трудно стабилизировать работу СЗМ вследствие малого быстродействия СС. Поэтому на практике длительность управляющего импульса τ_2 не может быть слишком большой, и условие $\tau_2 > 1/f_2$ может быть не выполнено при заданной резонансной частоте сканера f_2 . В этом случае необходимо подбирать такую амплитуду управляющего импульса U , чтобы величина перемещения сканера $l(\tau_2) \sim \alpha U \exp(-\tau_2 \cdot f_2)$ по направлению к колеблющемуся зонду была бы достаточной для осуществления динамического контакта.

Рассмотрим теперь условие, при котором в момент столкновения зонд проколет металлическую пленку. Очевидно, что для этого необходимо, чтобы механическое давление в области контакта превысило предел пластической деформации металлической пленки. Величину механического давления P в точке касания нанозондом поверхности образца можно оценить из выражения

$$P \sim M \cdot l(\tau_2) / (\tau_2^2 \cdot R^2),$$

где M – масса перемещающейся части сканера с образцом, R – радиус зонда. Тогда условием оптимальной реализации режима ДСЛ будет

$$P_p > P > P_s,$$

где P_p – предел пластической деформации зонда, P_s – предел пластической деформации образца. При $P < P_s$ сила воздействия будет недостаточна для модификации поверхности, в то время как при $P > P_p$ произойдет нежелательная деформация зонда.

Как видно из приведенной оценки, изменять давление в области динамического контакта при заданной массе перемещающейся части сканера с образцом и заданном радиусе зонда можно путем изменения амплитуды и длительности управляющего импульса с учетом рассмотренных выше ограничений.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Структура «металл–полимер» изготавливалась методом магнетронного распыления золотой мишени в плазме аргона. На поверхность поликарбоната наносилась золотая пленка толщиной 20 нм. Давление газа составляло 200 Па, ток разряда имел величину 30 мА. Расстояние от мишени до подложки составляло 4 см. Толщина пленки контролировалась резонансно-частотным методом. Зонды изготавливались из электрохимически заточенной вольфрамовой проволоки с исходным диаметром 150 мкм. Амплитуда колебаний зонда определялась по кривой подвода и составляла величину около 16 нм. На рис. 1 представлены РЭМ изображения зондов, полученные до и после процесса ДСЛ. Видно, что при малых углах при вершине зондов наблюдается необратимая деформация зондов. При углах более 30° в процессе ДСЛ вольфрамовые зонды вели себя устойчиво.

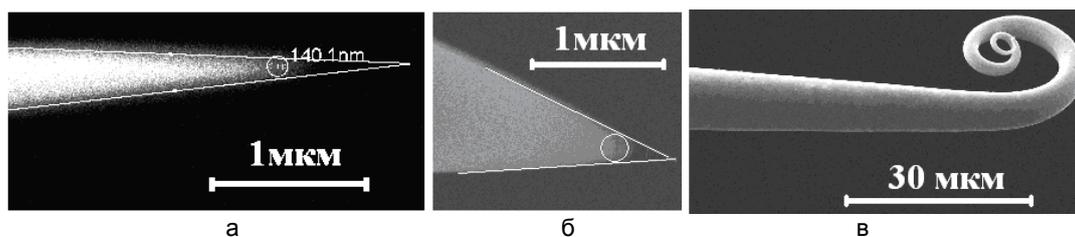


Рис. 1. РЭМ – изображения зондов: а) – до процесса ДСЛ, угол при вершине зонда $\alpha = 8,9^\circ$, диаметр закругления при вершине зонда $d=140$ нм; б) – до процесса ДСЛ, $\alpha = 29,9^\circ$, $d=240$ нм; в) зонд (а) после процесса ДСЛ

Исследовалось влияние амплитуды U и длительности τ_2 импульсов, управляющих перемещением сканера с образцом по направлению к зонду, на структуру полученных золотых пленок. Использовались вольфрамовые зонды с углом у вершины острия около 30° и радиусом закругления вершины 120 нм. Резонансная частота сканера f_2 измерялась экспериментально и составляла величину около 800 Гц ($1/f_2 = 1,25 \cdot 10^{-3}$ с). Резонансная частота колебаний пьезодатчика f_3 также измерялась экспериментально и имела величину около 8 кГц ($\tau_3 = 1,25 \cdot 10^{-4}$ с). Модификация поверхности осуществлялась путем точечного воздействия зонда на образец с шагом 500 нм вдоль осей X и Y . Размер модифицированной поверхности имел величину 7×7 мкм². Проведено две серии экспериментов. Первая серия экспериментов проводилась при постоянном значении $\tau_2 = 100$ мкс и разных значениях перемещения сканера. Таким образом, в первой серии выполнялись условия $\tau_2 < 1/f_2$ и $\tau_2 < \tau_3$. Смещение сканера оценивалось из выражения $l(\tau_2) \sim \alpha U (\tau_2 \cdot f_2)$ по известным значениям αU , изменяющимся от 200 нм до 350 нм. Таким образом, перемещение сканера с образцом происходило в диапазоне от 16 нм до 28 нм, т.е. выполнялось условие $l(\tau_2) \geq L$. Анализ полученных изображений (рис. 2) показал, что в этой серии экспериментов оптимальному режиму ДСЛ соответствуют значения $\tau_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ с и $l(\tau_2) = 20$ нм.

Во второй серии экспериментов фиксировалось значение U и изменялась длительность управляющего импульса τ_2 в диапазоне от 50 мкс до 300 мкс. В этой серии также выполнялось условие $\tau_2 < 1/f_2$, однако при $\tau_2 = 150, 200, 250$ и 300 мкс длительность импульса была больше периода колебаний датчика, $\tau_2 > \tau_3$. Анализ полученных результатов показывает, что при малых смещениях образца (16 нм) и малых длительностях импульсов управляющего напряжения (50 мкс) модификация золотой пленки не наблюдается (рис. 3, а). В то же время при больших смещениях (60 нм) и больших длительностях импульсов управляющего напряжения качество получаемых структур ухудшается.

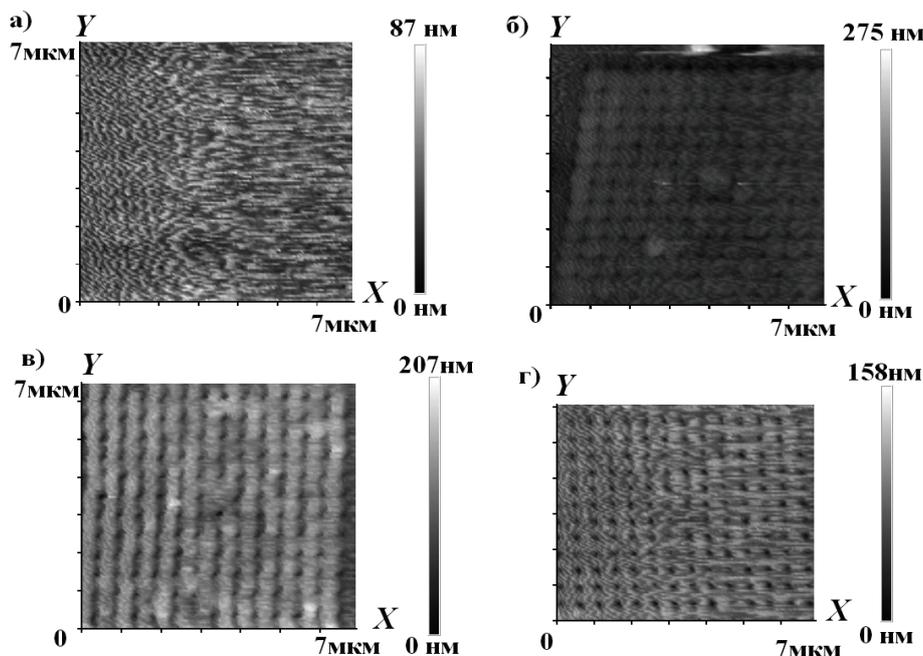


Рис. 2. Изображения поверхности поликарбоната с золотым покрытием толщиной 20 нм, полученные при различных параметрах ДСЛ: а) $l(\tau_2) = 16$ нм, $\tau_2 = 50\text{--}300$ мкс; б) $l(\tau_2) = 28$ нм, $\tau_2 = 100$ мкс; в) $l(\tau_2) = 60$ нм, $\tau_2 = 300$ мкс, г) $l(\tau_2) = 20$ нм, $\tau_2 = 100$ мкс

Наилучшее качество модифицированных структур наблюдается при $\tau_2=100$ мкс, $l(\tau_2)=20$ нм. На рис. 3 представлено поперечное сечение модифицированной области; видно, что глубина полости превышает толщину золотой пленки, т.е. при таких параметрах импульса в процессе ДСЛ металлическое покрытие полностью перерезается зондом. Характерный латеральный размер области модификации имеет величину около 100 нм, что совпадает с диаметром используемого вольфрамового зонда.

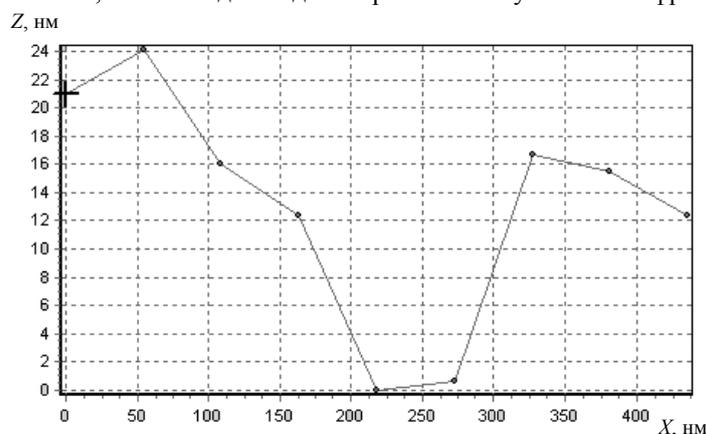


Рис. 3. Поперечное сечение области модификации при $l(\tau_2)=20$ нм и $\tau_2=100$ мкс

С целью получения адекватной информации о структурах, полученных методом ДСЛ, поверхность образцов исследовалась также в конфокальном оптическом микроскопе в отражательном режиме (рис. 4). Анализ изображений позволяет сделать вывод о том, что в процессе ДСЛ происходит удаление металлического слоя из области модификации. Отметим, что представленная на рис. 4 структура фактически является двумерной дифракционной решеткой с периодом около 500 нм.

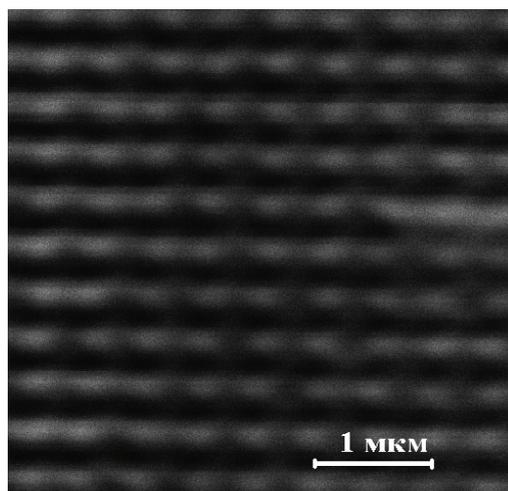


Рис. 4. Изображение золотой пленки толщиной 20 нм, нанесенной на поликарбонатную подложку после модификации методом ДСЛ, полученное в конфокальном микроскопе на отражение

Таким образом, показано, что, применяя метод ДСЛ к системе «металл – полимер», можно создавать дифракционные решетки на отражение с малым периодом.

Выводы

В результате проведенных исследований показано, что процесс модификации золотой пленки, нанесенной на поверхность поликарбонатной подложки, необходимо оптимизировать по амплитуде и длительности импульса управляющего напряжения. Метод ДСЛ позволяет модифицировать поверхность образца с одновременной визуализацией результатов модификации. При радиусе вольфрамового зонда около 100 нм золотая пленка толщиной 20 нм прорезается на всю глубину и удаляется с поверхности поликарбоната. Существует критический угол при вершине зонда, при котором наблюдается потеря формы зонда в процессе ДСЛ. Пространственное разрешение определяется радиусом используемых зон-

дов. С помощью ДСЛ в системе «металлическая пленка – полимер» можно создавать элементы наноэлектроники, нанопластики и наносенсоры. Для ответа на вопрос о предельном пространственном разрешении метода ДСЛ в системе «металлическая пленка – полимер» требуются дополнительные исследования, связанные с использованием специальных зондов и оптимальных металлических покрытий.

Авторы благодарят А.В. Вениаминова за измерения, выполненные на конфокальном микроскопе (рис. 4).

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки № 2.1.2/4187 «Многофункциональные нанозонды для сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии (СЗМ-С-Л): концепция, технология, характеристика, применение».

Исследования выполнены на оборудовании НОЦ-ИТ СПбГУ ИТМО.

Литература

1. Щука А.А. Нанoeлектроника. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.
2. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2006. – 160 с.
3. Голубок А.О., Васильев А.А., Керпелева С.Ю., Котов В.В., Сапожников И.Д. Датчик локального силового и туннельного взаимодействия в сканирующем зондовом микроскопе // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15. – № 1. – С. 62–69.
4. Стовпяга А.В., Пинаев А.Л., Голубок А.О. Исследование нанозонда для модификации поверхности полимера методом динамической силовой литографии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 58. – С. 86–91.

- Голубок Александр Олегович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, зав. кафедрой, golubok@ntspb.ru
- Пинаев Александр Леонидович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pinaich@mail.ru

УДК 004.8

МАТРОИДНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СЕМЕЙСТВА
ГРАФОВ СМЕЖНОСТИ НАД НАБОРОМ ФРАГМЕНТОВ ЗНАНИЙ

В.В. Опарин, А.А. Фильченков, А.В. Сироткин, А.Л. Тулупьев

В работе исследуется одна из задач, возникающих при автоматическом обучении баз фрагментов знаний с неопределенностью, представленных в виде алгебраических байесовских сетей – построение графа смежности как глобальной (вторичной) структуры сети по ее первичной структуре. Установлено, что семейство графов смежности при заданной первичной структуре сети характеризуется матроидом специального вида, что влечет ряд других заключений: множества минимальных и нередуцируемых графов смежности совпадают, минимальный граф смежности допускает построение с помощью жадного алгоритма, число ребер минимального графа смежности выражается через число ребер максимального графа смежности и ранг матроида.

Ключевые слова: базы фрагментов знаний, алгебраические байесовские сети, автоматическое обучение, глобальная структура, матроид, граф смежности.

Если ваша жизнь — матроид, вы можете пользоваться жадным алгоритмом: он будет работать. Иначе — не сто́ит.

Проф. А.А. Шальто

Введение

Одной из актуальных и активно исследуемых проблем в области проектирования, разработки и эксплуатации систем, основанных на знаниях, является их автоматическое обучение (машинное обучение, machine learning). Для каждого класса систем, основанных на знаниях, формируется своя совокупность задач автоматического обучения; в случае алгебраических байесовских сетей (АБС) [1–4], относящихся к классу логико-вероятностных графических моделей баз фрагментов знаний с неопределенностью, эта совокупность делится на несколько составляющих, среди которых выделяется задача обучения глобальной структуры АБС (или вторичной структуры АБС) по известной первичной структуре этой сети [5, 6].

Первичная структура АБС – это просто набор фрагментов знаний, где каждый фрагмент знаний является идеалом конъюнктов со скалярными или интервальными оценками вероятности истинности. Вторичная структура АБС (глобальная структура АБС) – это совокупность связей между фрагментами знаний, представленная в виде графа смежности (ГС) [1–4]. Одной и той же первичной структуре может соответствовать несколько графов смежности [1, 4, 7–9]; для реализации ряда алгоритмов логико-вероятностного вывода (проверка и поддержание непротиворечивости АБС, апостериорного вывода) выбор графа смежности существенен, причем наиболее удачным выбором графа смежности для формирования вторичной структуры АБС является ациклический граф смежности (дерево смежности) [2]. Отсюда возникает потребность как в исследовании семейства графов смежности, сформированных над одним и тем же набором фрагментов знаний, так и в выделении из этого семейства нередуцируемых и минимальных (по числу ребер) графов смежности (НГС и МГС соответственно), поскольку именно они могут оказаться ациклическими. Таким образом, описание семейства графов смежности, а также нередуцируемых и минимальных графов смежности становится целью настоящей работы.

Постановка задачи и определения

Пусть задан конечный алфавит $A = \{x_i\}_{i=1}^m$ и множество вершин $V = \{v_i\}_{i=1}^n$. На множестве вершин задана весовая функция $W: V \rightarrow 2^A$. Значение функции на конкретной вершине v будем называть *весом вершины* и обозначать его через W_v . В общем случае любое подмножество алфавита A будем называть *весом*.

Пусть на множестве вершин V построен некоторый граф $G = \langle V, E \rangle$. Рассмотрим вершины $u, v \in V$. Пусть $W_u \cap W_v = q \neq \emptyset$.

Определение 1. Назовем вершины u, v *магистрально связными*, если существует путь P из u в v , веса всех вершин которого содержат в себе q :

$$\exists P: u \mapsto v \forall p \in P q \subseteq W_p.$$

Определение 2. Назовем граф $G = \langle V, E \rangle$ *графом смежности*, если любая его пара вершин, пересечение весов которых не пусто, магистрально связна.

Заметим, что полный граф, построенный на множестве вершин V , всегда является графом смежности: любой паре вершин u, v можно сопоставить путь $P = \{u, v\}$.

Определение 3. Граф смежности $G = \langle V, E \rangle$ назовем *нередуцируемым графом смежности*, если после удаления любого ребра e из E , граф $G' = \langle V, E \setminus \{e\} \rangle$ не является графом смежности.

Пусть вершины $u, v \in V$ соединены ребром e .

Определение 4. *Нагрузкой* ребра e назовем множество $W_e = W_u \cap W_v$.

Определение 5. Множество нагрузок ребер полного графа $G = \langle V, E \rangle$ назовем *универсальным множеством нагрузок* Ω .

Рассмотрим некоторый произвольный вес q .

Определение 6. *Сужением* графа $G = \langle V, E \rangle$ на вес q назовем граф $G_{/q} = \langle V_q, E_q \rangle$, где

$$V_q = \{v \in V \mid q \subseteq W_v\},$$

$$E_q = \{(uv) \in E \mid u, v \in V_q\}.$$

Вспомогательные факты

В работе [7] было сформулировано утверждение: граф $G = \langle V, E \rangle$ – ГС тогда и только тогда, когда $\forall q \in \Omega$ $G_{/q}$ – связан. Несложно заметить, что G – НГС тогда и только тогда, когда для любого ребра $e \in E$ существует такое $q \in \Omega$, что сужение графа $G^- = \langle V, E \setminus \{e\} \rangle$ на q несвязно.

Утверждение 1. Пусть G – ГС. G – НГС тогда и только тогда, когда для $\forall e \in E$ сужение графа $G^- = \langle V, E \setminus \{e\} \rangle$ на $q = W_e$ несвязно.

Доказательство. Пусть $e = (s, t)$. Так как G – НГС, то существуют u и v такие, что все магистральные пути $P: u \mapsto v$ содержат ребро e . В противном случае e можно исключить из множества ребер, не нарушая магистральной связности графа.

Значит, между u и v не существует магистрального пути в G^- , или, если быть точнее, не существует магистрального пути между вершинами s и t . Значит, не существует пути в сужении графа G^- на вес $W_s \cap W_t = q$, что и требовалось доказать.

Обратное следует напрямую из утверждения, сформулированного в работе [1].

Следствие 1. Из данного утверждения можно сделать вывод: G является НГС тогда и только тогда, когда всякое ребро e из G в сужении на вес W_e является мостом.

Матроиды и графы смежности

Рассмотрим пару $M = \langle E, I \rangle$, где E – произвольное множество, а $I \subseteq 2^E$.

Определение 7. Пару $M = \langle E, I \rangle$ назовем матроидом [10], если она удовлетворяет следующим аксиомам:

- $\emptyset \in I$;
- $A \subseteq B, B \in I \Rightarrow A \in I$;
- $A, B \in I, |A| < |B| \Rightarrow \exists e \in B \setminus A: A \cup \{e\} \in I$.

Множество E в таком случае называют *носителем*, множества из I – *независимыми*, а само семейство I – *семейством независимых множеств*.

Назовем максимальные по включению независимые множества *базами* матроида. Семейство всех баз обозначим через U .

Рассмотрим полный граф $G_{\max} = \langle V, E \rangle$. В качестве носителя матроида выберем множество ребер E . Множество A назовем независимым ($A \in I$), если граф $G_A = \langle V, E \setminus A \rangle$ является графом смежности.

В работе [10] (см. теорему 1.2.3) доказано, что если семейство баз не пусто и $\forall A, B \in U \forall a \in A \setminus B \exists b \in B: A \cup \{b\} \setminus \{a\} \in U$, то $M = \langle E, I \rangle$ – матроид. Покажем, что $M = \langle E, I \rangle$ – матроид.

1) U – непусто. Для начала покажем, что $\emptyset \in I$. Рассмотрим граф $G_f = \langle V, E \rangle$. Данный граф полный, значит, является ГС. Так как $\emptyset \in I$, любое множество $A \in I$ ограничено сверху по включению множеством E , то существует максимальное по включению множество из I , т.е. U непусто.

2) $A, B \in U \forall a \in A \setminus B \exists b \in B : A \cup \{b\} \setminus \{a\} \in U$. Рассмотрим НГС $G_A = \langle V, E_A \rangle$ и $G_B = \langle V, E_B \rangle$, где $E_A = E \setminus A, E_B = E \setminus B$. По сути, требуется показать, что $\forall a \in E_B \setminus E_A \exists b \notin E_B : G = \langle V, E_A \cup \{a\} \setminus \{b\} \rangle$ – НГС.

Возьмем произвольное ребро $a = (s, t) \in E_B \setminus E_A$ веса q и добавим его в граф G_A . Рассмотрим полученный граф $G_A^+ = \langle V, E_A \cup \{a\} \rangle$. Покажем, что любой магистральный путь между вершинами s и t содержит в себе ребра веса q .

Пусть в сужении $G_{A/q}$ существует простой путь P из s в t , который не содержит в себе ребер веса q . Рассмотрим последовательно каждую пару вершин (p_i, p_{i+1}) из пути P . По предположению, $q \subset W_{(p_i, p_{i+1})}$. Так как G_B – НГС, то существует магистральный путь P_i в G_B , соединяющий вершины p_i, p_{i+1} . Соединив последовательно все пути P_i в единую цепочку, мы получим магистральный путь в G_B , не содержащий ребер веса q . Так как нагрузка пути содержит в себе вес q , то каждая вершина будет лежать в сужении $G_{B/q}$. Значит, ребро a не является мостом в $G_{B/q}$, т.е. G_B – не НГС по следствию 1. Получили противоречие. Значит, любой простой путь P из s в t графа G_A содержит хотя бы одно ребро $b = (s', t')$ веса q . Отметим, что по следствию 1 в сужении $G_{A/q}$ ребро b является мостом. Таким образом, любой простой путь между вершинами s и t должен содержать в себе b .

Если удалить из графа G_A^+ такое ребро b , то в полученном графе $G = \langle V, E_A \cup \{a\} \setminus \{b\} \rangle$ вершины s' и t' останутся связанными в сужении $G_{/q}$ (или же магистрально связанными в графе G). Таким образом, G будет ГС.

Покажем, что G – НГС. Удалим ребро a из графа G . Получим граф $G^- = \langle V, E_A \setminus \{b\} \rangle$. Напомним, что b являлось мостом в сужении графа $G_A = \langle V, E_A \rangle$ на собственный вес q . Значит, сужение $G_{/q}^-$ несвязно, т.е. G^- не является ГС.

Удалим произвольное ребро $l \neq a$ из графа G веса r . Получим граф $H^- = \langle V, E_A \cup \{a\} \setminus \{b, l\} \rangle$. В сужении $G_{A/r}$ ребро l являлось мостом. Пусть l соединяло компоненты связности K_x и K_y через вершины x и y соответственно. Если в сужении $G_{/r}$ ребро l – мост, то сужение $H_{/r}^-$ является несвязным. В противном случае в сужении $G_{/r}$ должны были быть добавлены ребра, соединяющие K_x и K_y . Такое ребро всего одно – ребро a .

Так как в $G_{A/r}$ ребро l являлось мостом, то пересечение весов любых двух вершин K_x и K_y равно r . Отсюда получаем, что $W_a = q = r = W_l$. Но тогда в сужении $G_{/r} = G_{/q}$ существует простой путь между вершинами s и t , не проходящий через ребро a . Значит, в сужении $G_{A/r}$ существует простой путь между вершинами s и t , не затрагивающий ребро b , что противоречит рассуждениям выше. Таким образом, любое ребро построенного графа G в сужении на свой вес является мостом, т.е. граф G – НГС.

Из доказанных утверждений следует, что двойка $M = \langle E, I \rangle$ – матроид.

Следствия

В работе [10] (см. лемму 1.2.1) доказано, что любые две базы содержат в себе равное число элементов. Это число называется рангом матроида $r(M)$. Переходя к языку графов смежности, получаем, что число ребер во всех нередуцируемых графах одинаково. Значит, минимальный и нередуцируемый графы суть одно и то же.

Число ребер в минимально графе смежности $G_{\min} = \langle V, E_{\min} \rangle$ можно охарактеризовать числом $|E_{\max}| - r(M)$, где $|E_{\max}|$ – число ребер в полном графе смежности, а $r(M)$ – ранг соответствующего матроида.

Из следствия 1 можно также сделать вывод, что число ребер в минимальном графе G_{\min} есть число мостов во всех сужениях на $q \in \Omega$. Так как всякое сужение G_{\min} связно, то число мостов в любом сужении $G_{\min/q}$ ровно на единицу меньше числа компонент связности в соответствующем графе $G_q = \langle V_q, E_q \rangle$, где

$$V_q = \{v \in V \mid q \subseteq W_v\},$$

$$E_q = \{(u, v) \in E \mid u \in V, v \in V, q \subset W_{(u,v)}\}.$$

Из алгебраической теории графов [11] следует, что число компонент связности в графе G_q есть $|V_q| - \text{rank } A_q$, где A_q – матрица инцидентности графа G_q . Отсюда

$$|E_{\min}| = \sum_{q \in \Omega} [|V_q| - \text{rank } A_q - 1].$$

Заключение

Установлено, что семейство графов смежности над заданной совокупностью фрагментов знаний может быть охарактеризовано с помощью матроида специального вида. Непосредственным следствием этого утверждения является то, что минимальный (по числу ребер) граф смежности является нередуцируемым, а нередуцируемый граф смежности – минимальным. Кроме того, возможность представления семейства графов смежности в виде матроида обеспечивает, в свою очередь, возможность построения минимального графа смежности с помощью жадного алгоритма. При этом достаточно построить один минимальный граф смежности, чтобы определить, возможно ли построение ациклической вторичной структуры алгебраической байесовской сети над заданной совокупностью фрагментов знаний или нет. Если такой минимальный граф смежности будет содержать цикл, то и во всех остальных графах смежности будут обнаруживаться циклы; в этом случае изначальную совокупность фрагментов знаний потребуется модифицировать. Если же хоть один минимальный граф смежности не содержит циклов, то и все остальные минимальные графы смежности будут ациклическими. Наконец, удалось дать точную оценку числу ребер в минимальном графе смежности: оно равно разности числа ребер в максимальном графе смежности и ранга матроида.

Ряд вопросов программной реализации, оценок сложности и корректности алгоритмов построения вторичной структуры АБС был рассмотрен в работах [2, 4, 7–9].

Решенные задачи актуальны не только для теории автоматического обучения алгебраических байесовских сетей, но и для других математических моделей баз фрагментов знаний, где формирование глобальной структуры подчиняется тем же требованиям.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-01-00861-а «Методология построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений на основе баз фрагментов знаний с вероятностной неопределенностью».

Литература

1. Опарин В.В., Тулупьев А.Л. Синтез графа смежности с минимальным числом ребер: формализация алгоритма и анализ его корректности // Труды СПИИРАН. – 2009. – Вып. 11. – СПб: Наука, 2009. – С. 142–157.
2. Тулупьев А.Л. Алгебраические байесовские сети: глобальный логико-вероятностный вывод в деревьях смежности: Учеб. пособие. – СПб: СПбГУ; ООО Издательство «Анатолия», 2007. – 40 с.
3. Тулупьев А.Л. Байесовские сети: логико-вероятностный вывод в циклах. – СПб: СПбГУ, 2008. – 140 с.
4. Тулупьев А.Л. Задача локального автоматического обучения в алгебраических байесовских сетях: логико-вероятностный подход // Труды СПИИРАН. – 2008. – Вып. 7. – СПб: Наука, 2008. – С. 11–25.
5. Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В. Байесовские сети: логико-вероятностный подход. – СПб: Наука, 2006. – 607 с.
6. Тулупьев А.Л., Сироткин А.В., Николенко С.И. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах. – СПб: СПбГУ, 2009. – 400 с.
7. Тулупьев А.Л., Столяров Д.М., Ментюков М.В. Представление локальной и глобальной структуры алгебраической байесовской сети в Java-приложениях // Труды СПИИРАН. – 2007. – Вып. 5. – СПб: Наука, 2007. – С. 71–99.
8. Фильченков А.А., Тулупьев А.Л. Структурный анализ систем минимальных графов смежности // Труды СПИИРАН. – 2009. – Вып. 10. – СПб: Наука, 2009. – С. 104–127.
9. Korb K.B., Nicholson A.E. Bayesian Artificial Intelligence. – New York: Chapman and Hall/CRC, 2004. – 364 p.
10. Oxley J.G. Matroid theory. – New York: Oxford University Press, 2006. – 532 p.
11. Norman B. Algebraic graph theory (2nd edition). – Cambridge: Cambridge University Press, 1996. – 205 p.

Опарин Всеволод Владиславович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, oparin.vsevolod@gmail.com
Фильченков Александрович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, aaafil@mail.ru
Сироткин Владимирович	– Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, младший научный сотрудник, avs@iias.spb.su
Тулупьев Львович	– Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. лабораторией, ALT@iias.spb.su, ALT4488@peterstar.ru

УДК 004

ПАКЕТ ПОЛУФОРМАЛИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.Н. Малышева, С.Л. Гольдштейн

Статья посвящена созданию концептуальной, структурной и модификации алгоритмической моделей системы имитационного моделирования. Цель моделирования – консалтинговая поддержка при разрешении проблемных ситуаций в деятельности организации.

Ключевые слова: система имитационного моделирования, концептуальная, структурная и алгоритмическая модели.

Введение

Моделирование современных бизнес-процессов – это мощный инструмент, позволяющий анализировать не только то, как работает организация в целом, но и как организована деятельность на каждом отдельно взятом рабочем месте [1]. С одной стороны, моделирование может быть реализовано как метод, позволяющий дать оценку текущей деятельности организации. С другой стороны, оно может быть представлено как средство, позволяющее предвидеть различные ситуации, на основе анализа которых возможна минимизация рисков, возникающих на различных этапах деятельности организации. Последние годы для этого эффективно используют системы имитационного моделирования (ИМ) [2]. Они позволяют определить оптимальность изменений за считанные минуты, необходимые для проведения экспериментов с разными параметрами, отвечая на вопросы типа «что, если...»; решать задачи из любых областей – производства, логистики, финансов, здравоохранения. При этом новая политика, управляющие процедуры, правила принятия решений, организационная структура, потоки информации и т.д. могут быть исследованы без вмешательства в работу реальной системы; новые технические средства, планы размещения, программное обеспечение, транспортные системы и т.п. могут быть опробованы до того, как деньги, время и другие ресурсы будут потрачены на их приобретение и (или) создание [3]. Однако, системы ИМ имеют такие недостатки, как отсутствие управления процессом моделирования, использования развитой трехмерной анимации, возможности фиксации и оценки отдельных временных параметров системы. В результате модели одной и той же реальной системы, построенные разными аналитиками, могут иметь отличия. Системы ИМ не совершенны: они нуждаются в доработке [4].

В данной статье поставлена задача создания пакета полуформализованных моделей системы ИМ с целью устранения этих недостатков. Известно, что моделирование может быть осуществлено по состояниям «как есть» и «как должно быть». В данной статье моделируется состояние «как должно быть» (ТО-ВЕ).

Концептуальная модель системы ИМ

На основе принципов системотехники [5], создана общая концептуальная модель (ОКМ) системы ИМ. Прототипной формой служил материал [6–8].

Система ИМ – это сложный комплекс, выполняющий группы функций – формулирование проблемы, определение границ системы, формулирование модели, подготовка данных, трансляция модели, оценка адекватности, стратегическое и тактическое планирование, экспериментирование, интерпретация, реализация, документирование, графика, управление и оценка ситуации, реализуемые путем современных технологий ИМ (AnyLogic, Arena, eM-Plant, GPSS и др.), на основе структуры из подсистем: формулирования проблемы, определения границ системы, формулирования модели, подготовки данных, трансляции модели, оценки адекватности, стратегического и тактического планирования, экспериментирования, интерпретации, реализации, документирования, графики, управления и оценки ситуации, направленные на удовлетворение интересов всех субъектов деятельности с группами глобальных и локальных целей.

Структурная и алгоритмическая модели системы имитационного моделирования

На основе принципов системотехники [5] создана структурная и модифицирована алгоритмическая модель предлагаемого решения по системе ИМ (рис. 1, 2). Прототипной формой служил материал [6, 7, 9, 14]. В качестве прототипа блока «3D анимация» взят редактор трехмерной графики 3D Studio Max [10], «Управление работой системы ИМ» – средства управления программным обеспечением Microsoft [11]. Поскольку любая организация является динамической системой, т.е. ее поведение можно описать системой дифференциальных уравнений и, исследуя ее, получить сведения о происходящем явлении и возможность его мониторировать, то в качестве прототипа математического описания динамической системы (блок «Математика») и ее мониторирования (блок «Мониторирование») взяты материалы Э.

Камке [12], а средства визуализации (блок «Визуализация») – Mathcad [13]. При этом подсистема «Оценка ситуации» связана с остальными составляющими системы ИМ путем использования объектно-ориентированного языка.

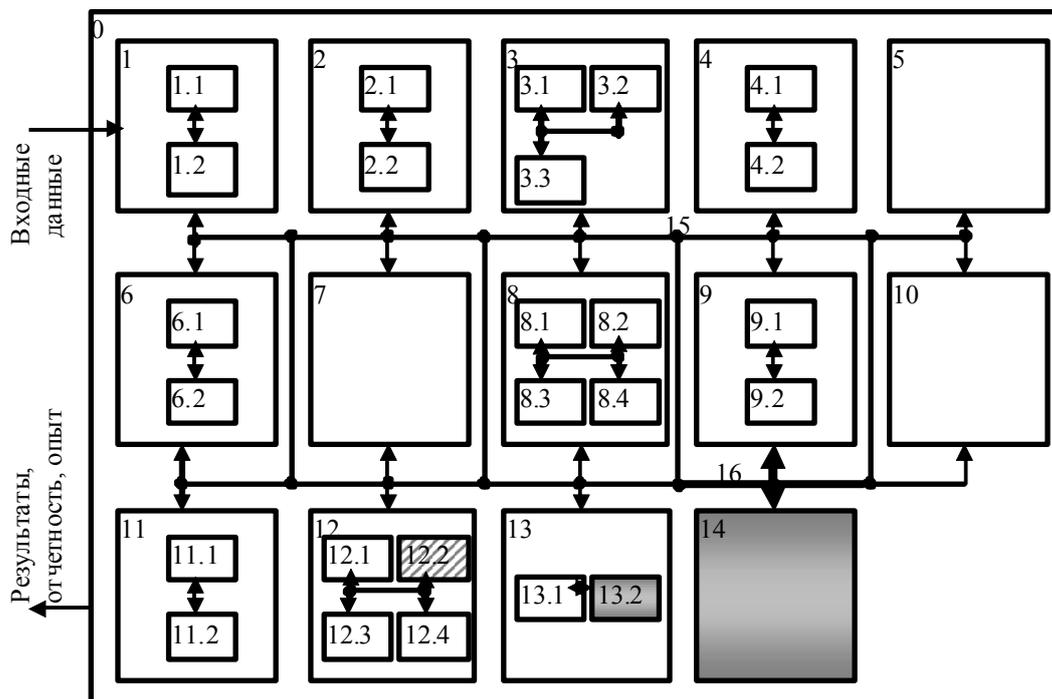


Рис. 1. Структурная модель предлагаемого решения системы ИМ (ТО-ВЕ):

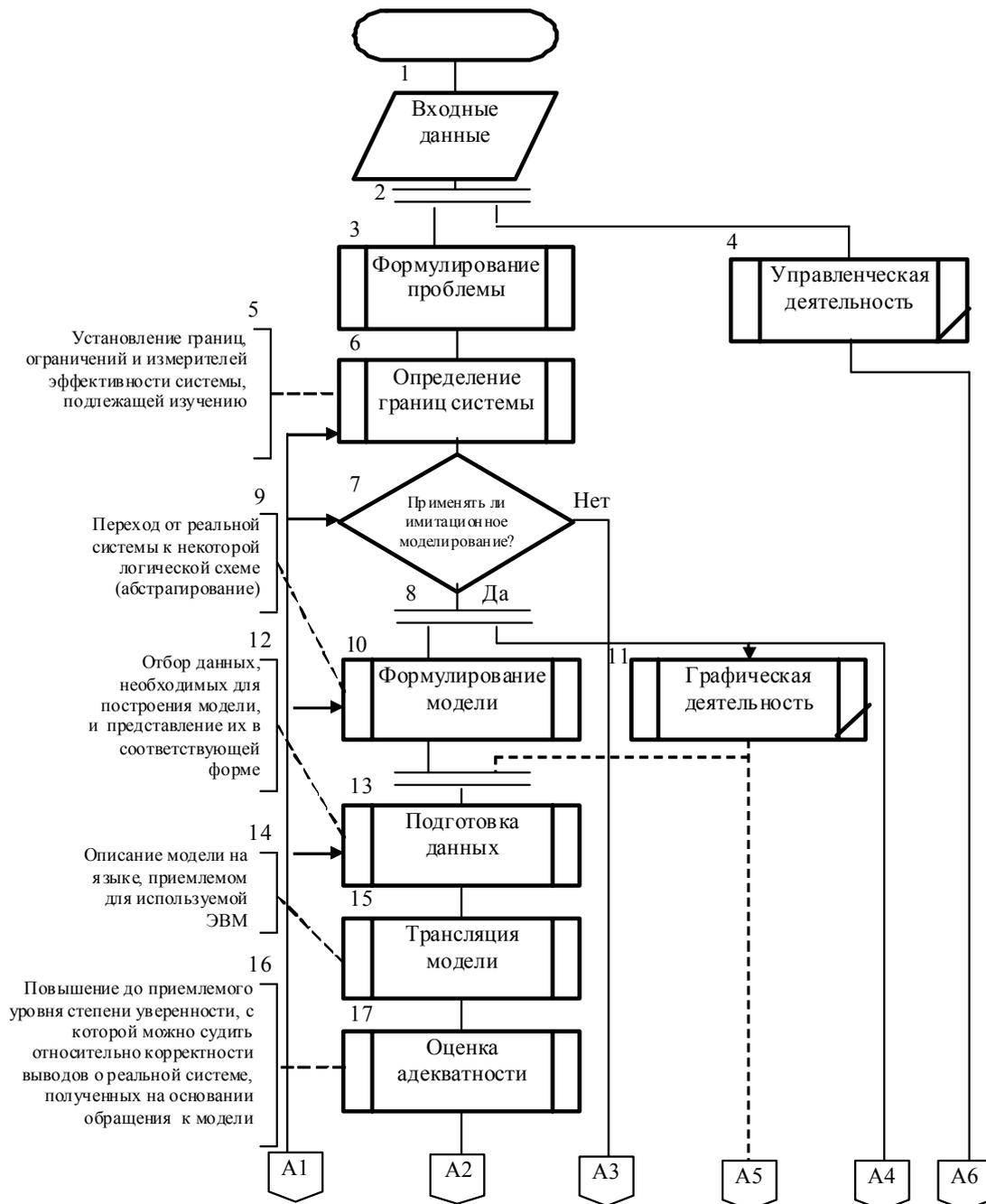
0 – система ИМ, подсистемы: 1 – формулирования проблемы, 2 – определения границ системы, 3 – формулирования модели, 4 – подготовки данных, 5 – трансляции модели, 6 – оценки адекватности, 7 – стратегического и тактического планирования, 8 – экспериментирования, 9 – интерпретации, 10 – реализации, 11 – документирования, 12 – графики, 13 – управления, 14 – оценки ситуации, 15 – интерфейс, 16 – новый интерфейс; блоки программных модулей системы: 1.1 – коллекции классов активных объектов, таймеров, сообщений, модулей Java, 1.2 – «Новый проект»; 2.1 – «Ограничения», 2.2 – «Оптимизатор»; 3.1 – «Переменная», 3.2 – «Зависимости переменных», 3.3 – «Диаграммы для формулирования модели»; 4.1 – «Библиотеки», 4.2 – «Уравнения, матрицы и массивы»; 6.1 – «Построить», 6.2 – «Вывод»; 8.1 – «Новый эксперимент», 8.2 – «Эксперимент», 8.3 – «Дополнительные свойства эксперимента», 8.4 – «Установки оптимизации»; 9.1 – «Новый набор данных», 9.2 – «Диаграммы и анимация для интерпретации»; 11.1 – «Документирование», 11.2 – «Интеграция»; 12.1 – «Анимация», 12.2 – «3D анимация», 12.3 – «Запуск анимации и 3D анимации», 12.4 – «Настройки анимации»; 13.1 – «Управление выполнением модели», 13.2 – «Управление работой системы ИМ»; новизна старшего и второго рангов обозначена серым фоном, улучшение второго ранга обозначено штриховкой

Заключение

Таким образом, созданы общая концептуальная и структурная модели, а также модифицирована алгоритмическая модель системы имитационного моделирования. В них устранены недостатки, связанные с отсутствием управления процессом моделирования, использования развитой трехмерной анимации, возможности фиксации и оценки отдельных временных параметров системы, путем добавления подсистемы оценки ситуации и блока управления работой системы имитационного моделирования, а также улучшения блока трехмерной анимации. Полученные модели призваны быть маршрутизатором для дальнейшего структурного, функционально-структурного, критериального и т.п. моделирования, учитывающего специфику конкретной сферы.

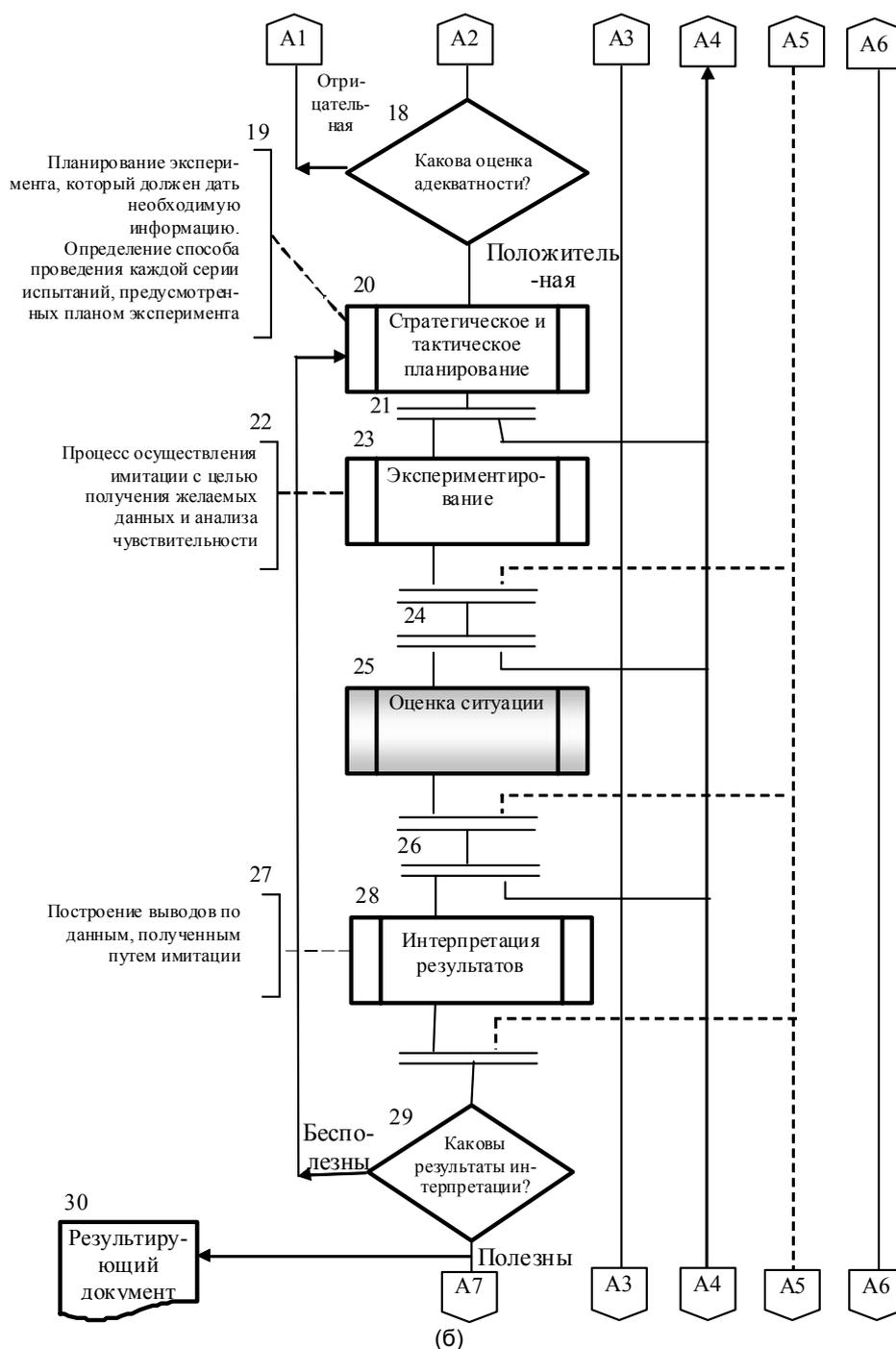
Литература

1. Ильин В. В. Моделирование бизнес-процессов. Практический опыт разработчиков. – М.: Вильямс, 2006. – 176 с.
2. Румянцев М.И. Средства имитационного моделирования бизнес-процессов // Корпоративные системы: сетевой журн. – 2007. – № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.management.com.ua/ims/ims135.html> (дата обращения: 04.07.2009).



(а)

3. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Имитационное моделирование сложных динамических систем // EXPonenta.ru. Образовательный математический сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds_sim.asp (дата обращения: 03.06.2009).
4. Кобелев Н.Б. Имитационное моделирование. Что к нему относить и как понимать? (по следам конференции ИММОД-2005) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.gpss.ru/statykobeleva_w.html (дата обращения: 01.07.2009).
5. Гольдштейн С.Л., Ткаченко Т.Я. Введение в системологию и системотехнику. – Екатеринбург: ИРРО, 1994. – 198 с.
6. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Перевод с англ. под ред. Е.К. Масловского. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
7. Карпов Ю.Г., Борщев А.В. ANYLOGIC – Инструмент имитационного моделирования нового поколения // Телематика 2004: Материалы XI Всероссийской научно-методической конференции (7–10 июня 2004 г., Санкт-Петербург). – СПб, 2004. – С. 58–64.
8. Гольдштейн С.Л., Московских В.А. Пакет концептуальных моделей деятельности на рынке гражданского строительства // Интеллектика, логистика, системология. Вып. 17 / Под ред. В.В. Ерофеева. Челябинск, 2006. – С. 57–82.



(б)

9. Ткаченко Т.Я. Инструментальная среда системотехнического обслуживания сложных объектов. – Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. – 203 с.
10. Бонни Ш. Внутренний мир 3ds Max 9. Autodesk 3D Studio max 9. – 2007. – 1072 с.
11. Елманова Н. Средства управления программным обеспечением Microsoft: планы и перспективы // КомпьютерПресс. – 2004. – № 6. – С. 15–24.
12. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Перевод с нем. С.В. Фомина: Изд. 2, пер. и доп. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 654 с.
13. Дьяконов В. Mathcad 11/12/13 в математике: справочник (с CD-ROM). – М.: Горячая Линия–Телеком, 2007. – 958 с.
14. Гольдштейн С.Л., Кулигин В.А. Пакет алгоритмических моделей жизненного цикла топ-менеджмента комплексного промышленного строительства // Интеллектика, логистика, системология. Вып. 17 / Под ред. В.В. Ерофеева. – Челябинск, 2006. – С. 57–82.

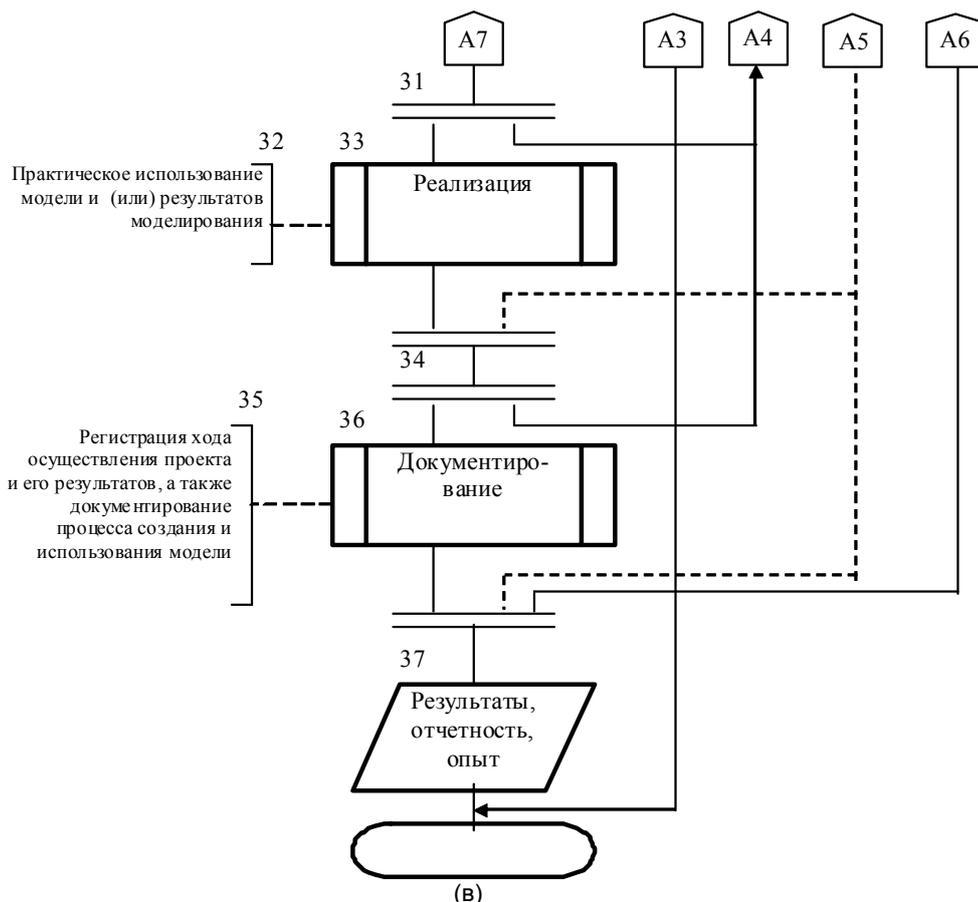


Рис. 2, а-в. Алгоритмическая модель предлагаемого решения системы ИМ (ТО-ВЕ): новизна старшего ранга (блок оценки ситуации) обозначена серым фоном, новизна второго ранга (подблок управленческой деятельности) и улучшение второго ранга (подблок графической деятельности) обозначены уголком

- Мальшова Екатерина Николаевна* – ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», аспирант, katyona@bk.ru
- Гольдштейн Сергей Львович* – ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, vtssl@dpt.ustu.ru

УДК 621.3.085.42

КОДОВЫЕ ШКАЛЫ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А.А. Ожиганов, П.А. Прибыткин

Рассматривается метод построения однокорректных кодовых шкал на основе нелинейных двоичных последовательностей для преобразователей угловых перемещений. Приводится пример построения шкалы с использованием предлагаемого метода.

Ключевые слова: M-последовательность, нелинейная последовательность, кодовая шкала, считывающие элементы.

Введение

В работах [1–4] предложены кодовые шкалы (КШ) для преобразователей угловых перемещений, названные псевдослучайными кодовыми шкалами (ПСКШ) и строящиеся на основе использования теории псевдослучайных двоичных последовательностей максимальной длины (M-последовательностей). ПСКШ имеют всего одну информационную кодовую дорожку, выполненную в соответствии с символами M-последовательности $a_0 a_1 \dots a_{M-1}$, и n считывающих элементов (СЭ), размещенных вдоль дорожки. Считывающие элементы дают возможность получить при полном обороте шкалы $M = 2^n - 1$ различных n -

разрядных кодовых комбинаций и обеспечивают разрешающую способность преобразователя угловых перемещений на основе ПСКШ $\delta = 360^\circ / M$.

Как следует из метода построения ПСКШ, ее разрешающая способность определяется длиной М-последовательности $M = 2^n - 1$. Очевидно, что при любой разрядности шкалы теряется одна (нулевая) кодовая комбинация. Однако при построении некоторых технических систем с использованием преобразователей угловых перемещений необходимо обеспечить разрешающую способность последних, кратную 2^n . Ниже предлагается метод построения КШ на основе нелинейных двоичных последовательностей, обеспечивающий разрешающую способность шкалы $\delta = 360^\circ / 2^n$.

Теоретические основы метода

Нелинейная последовательность – это последовательность двоичных символов $\{a_j\}$ длины $B=2^n$, удовлетворяющих рекурсивному соотношению [5]

$$a_{n+j} = \bigoplus_{i=0}^{n-1} a_{i+j} h_i \oplus \prod_{i=1}^{n-1} \bar{a}_{i+j}, \quad j = 0, 1, \dots, B - n - 1, \quad (1)$$

где знак \oplus означает суммирование по модулю два, а индексы при символах последовательности берутся по модулю B . Начальные значения символов $a_0 a_1 \dots a_{n-1}$ последовательности выбираются произвольно.

В (1) h_i – коэффициенты, зависящие от вида примитивного полинома степени n с коэффициентами поля Галуа $GF(2)$ [6], т. е.

$$h(x) = \sum_{i=0}^n h_i x^i, \quad (2)$$

где $h_0 = h_n = 1$, а $h_i = 0, 1$ при $0 < i < n$,

$$\prod_{i=1}^{n-1} \bar{a}_{i+j} = \begin{cases} 1, & \text{если все } \bar{a}_{i+j} = 1, \\ 0 & \text{– в других случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

Первое слагаемое в (1) определяет правило образования линейной по отношению к оператору суммирования по модулю 2 М-последовательности, а второе слагаемое указывает на операцию умножения значений $n-1$ кодовых символов. Это приводит к тому, что полученная последовательность символов становится нелинейной и в ней появляется комбинация, содержащая n последовательных нулей. Таким образом, нелинейная последовательность может быть получена из М-последовательности, если к ней в месте расположения $n-1$ нулей добавить 0.

Метод построения кодовых шкал на основе нелинейных двоичных последовательностей

Сформулируем метод построения n -разрядной одноканальной КШ на основе нелинейной последовательности. В дальнейшем изложении будем называть такие шкалы нелинейными кодовыми шкалами (НКШ).

1. В зависимости от требуемой разрядности шкалы n выбирается полином $h(x)$ степени n [6].
2. Используя рекурсивное соотношение (1), генерируется последовательность $\{a_j\}$.
3. Элементарные участки (кванты) шкалы δ выполняются в соответствии с символами нелинейной последовательности $\{a_j\}$, где символам 1 последовательности соответствуют активные, а символам 0 – пассивные участки информационной дорожки. Для определенности символы последовательности отображаются на информационной дорожке по направлению движения часовой стрелки в порядке $a_0 a_1 \dots a_{B-1}$.
4. Осуществляется размещение на шкале n считывающих элементов с шагом, равным одному кванту, т.е. в соответствии с полиномом размещения

$$r(x) = \sum_{m=0}^{n-1} x^m. \quad (4)$$

Единственность такого размещения объясняется нелинейными свойствами рассматриваемой последовательности.

Покажем, что круговые одноканальные НКШ позволяют строить на своей основе преобразователи перемещения, использующие метод параллельного считывания. Для этого сформулируем следующие утверждения.

Утверждение 1. НКШ позволяют получить ровно B различных n -разрядных кодовых комбинаций, соответствующих последовательности из B квантов перемещения.

Доказательство. Рассмотрим фрагмент нелинейной последовательности из n последовательных символов. Он соответствует некоторой кодовой комбинации $a_j a_{j+1} \dots a_{j+n-1}$, воспроизводимой с информационной дорожки НКШ считывающим узлом из n элементов. Считывающие элементы на НКШ расположены

с шагом в один квант, положение кодированного элемента – произвольное. После перемещения шкалы на k квантов ($k < B$) с информационной дорожки шкалы считывающим узлом будет воспроизводиться n -разрядная кодовая комбинация $a_{j+k}a_{j+k+1} \dots a_{j+k+n-1}$. Условие равенства этих кодовых комбинаций, т.е.

$$a_j a_{j+1} \dots a_{j+n-1} = a_{j+k} a_{j+k+1} \dots a_{j+k+n-1} \tag{5}$$

означает, что период нелинейной последовательности равняется k . Это противоречит свойству нелинейной последовательности (полученной, в свою очередь, из М-последовательности), по которому ее период $B = 2^n$ [5]. Следовательно, эти кодовые комбинации должны быть различны. Так как число символов нелинейной последовательности равно B , то каждому перемещению НКШ на один квант соответствует своя n -разрядная кодовая комбинация, и их будет равно B , что и требовалось доказать.

Утверждение 2. Разрешающая способность однопорочечной НКШ определяется соотношением

$$\delta = \frac{360^\circ}{B} \tag{6}$$

Доказательство. Доказательство очевидно, так как НКШ имеют кодовую дорожку с числом квантов $B = 2^n$ и позволяют получить при полном обороте шкалы B различных n -разрядных кодовых комбинаций.

Пример построения кодовой шкалы

Продемонстрируем метод построения круговой однопорочечной НКШ примером (см. рисунок), для простоты ограничившись четырьмя разрядами преобразования.

Информационная дорожка шкалы выполнена в соответствии с символами нелинейной последовательности $\{a_j\} = a_0 a_1 \dots a_{15} = 0000100110101111$ длины $B = 2^n = 2^4 = 16$, для построения которой использован примитивный полином $h(x) = x^4 + x + 1$, а символы a_{4+j} последовательности a при начальных значениях $a_0 = a_1 = a_2 = a_3 = 0$ удовлетворяют рекурсивному соотношению $a_{4+j} = a_{1+j} \oplus a_j \oplus a_{1+j} a_{2+j} a_{3+j}$, $j = 0, 1, \dots, 11$. В примере размещение четырех СЭ вдоль кодовой дорожки определяется полиномом $r(x) = 1 + x + x^2 + x^3$.

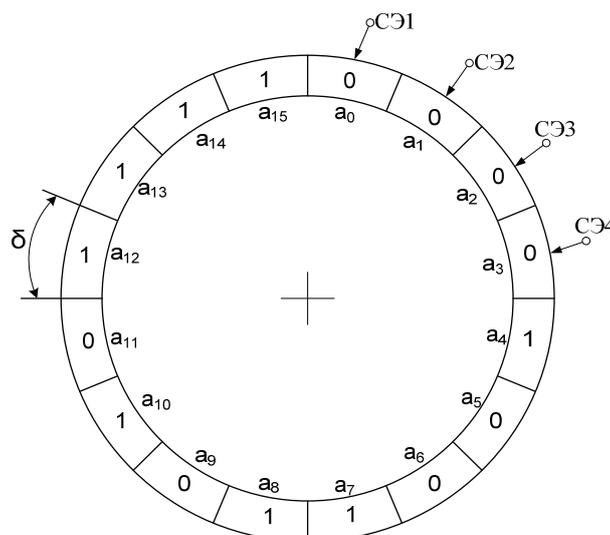


Рисунок. Четырехразрядная НКШ с размещением СЭ в соответствии с полиномом $r(x) = 1 + x + x^2 + x^3$

Фиксируя считывающими элементами СЭ₁, СЭ₂, СЭ₃ и СЭ₄ последовательно кодовую комбинацию при перемещении шкалы циклически на один элементарный участок, например, против направления движения часовой стрелки, получаем шестнадцать различных четырехразрядных кодовых комбинаций: 0000, 0001, 0010, 0100, 1001, 0011, 0110, 1101, 1010, 0101, 1011, 0111, 1111, 1110, 1100, 1000.

Заключение

Рассмотренный в данной работе метод построения кодовых шкал на основе нелинейных двоичных последовательностей может быть положен в основу построения преобразователей угловых перемещений, работающих по методу считывания. При этом предлагаемые НКШ имеют всего одну информационную кодовую дорожку и разрешающую способность, равную классическим КШ, маска которых выполнена в обыкновенном двоичном коде или в коде Грея. Следует также отметить, что предложенный метод полностью инвариантен к разрядности преобразователя.

Литература

1. Ожиганов А.А. Псевдослучайные кодовые шкалы // Изв. вузов. Приборостроение. – 1987. – Т. 30. – № 2. – С. 40–43.
2. Ожиганов А.А. Алгоритм размещения считывающих элементов на псевдослучайной кодовой шкале // Изв. вузов. Приборостроение. – 1994. – Т. 37. – № 2. – С. 22–27.
3. Ожиганов А.А., Тарасюк М.В. Размещение на псевдослучайной кодовой шкале считывающих элементов с постоянным шагом // Изв. вузов. Приборостроение. – 1994. – Т. 37. – № 11–2.
4. Ожиганов А.А., Тарасюк М.В., Медунецкий В.М. Преобразователи угла на основе композиции из псевдослучайных кодовых шкал // Изв. вузов. Приборостроение. – 1995. – Т. 38. – № 5–6. – С. 20–23.
5. Агульник А.Р., Мусаелян С.С. Построение нелинейных двоичных последовательностей // Радиоэлектроника. – 1983. – № 4. – С.19–28.
6. Макуильямс Ф.Д., Слоан Н.Д. Псевдослучайные последовательности и таблицы // ТИИЭР. – 1976. – Т. 64. – № 12. – С. 80–95.

Ожиганов Александр Аркадьевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ojiganov@mail.ifmo.ru

Прибыткин Павел Александрович – ОАО «Авангард», начальник сектора, pavel.pribitkin@gmail.com

УДК 621.391

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ СБИС ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВИДЕОДАНЫХ

А.А. Умбиталиев, Н.Н. Шипилов, С.М. Ибатуллин, Ш.С. Фахми

Рассматривается новый подход к распространению компрессированного видеоконтента с одновременным использованием двух альтернативных технологий сжатия движущихся изображений: 1) на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования (не стандартизованная на сегодняшний день технология); 2) на основе двумерного дискретного косинусного преобразования цифрового телевизионного сигнала (технология, предусмотренная стандартами MPEG-2, MPEG-4/AVC, H.264). В рамках указанного подхода предлагается метод и сложно-функциональный блок быстрого преобразования потока видеоданных, сжатых по технологии трехмерного дискретного косинусного преобразования, в компрессированный поток стандартного формата MPEG-2.

Ключевые слова: дискретное косинусное преобразование, СФ-блок, транскодер.

Введение

По данным исследований, суммарный поток видеоданных (IPTV, видео по требованию, обмен индивидуальными видеоматериалами) составит в 2013 г. не менее 90% пользовательского телекоммуникационного трафика, а на долю только лишь интернет-видео придется более 60% всего пользовательского трафика Сети. В связи с указанной тенденцией чрезвычайно актуальной становится проблема эффективного сжатия видеоданных в магистральных телекоммуникационных сетях с использованием новых прогрессивных технологий компрессии телевизионного сигнала при сохранении обширной инсталлированной базы цифровых абонентских приемников, телеприставок и видеоплееров. В успешном решении данной проблемы заинтересованы практически все субъекты мультимедийного рынка: магистральные операторы, Интернет-провайдеры, операторы кабельного телевидения и конечные пользователи. Действительно, повышение степени сжатия передаваемого видеоматериала без ухудшения его качества может обеспечить существенное увеличение доходов магистральных операторов и Интернет-провайдеров, предоставляющих мультимедийные услуги по сбалансированным ценам, поскольку в этом случае становится возможным значительный рост удельного объема услуг, приходящихся на единицу сетевого трафика. В то же время окажутся защищенными инвестиции операторов кабельного телевидения и интересы миллионов потребителей видеоконтента, эксплуатирующих абонентское оборудование стандартов MPEG-2, MPEG-4/AVC, H.264.

Актуальность проблемы

К числу современных решений в сфере многоуровневого кодирования распространяемого видеоконтента следует отнести транскодеры Cisco ART [1], позволяющие преобразовывать видеопоток MPEG-4/AVC в формат MPEG-2, не выходя за рамки общей для указанных стандартов технологии компрессии видео на основе двумерного дискретного косинусного преобразования отсчетов (2ДКП-технология). 2ДКП-технология компрессии видео применяется обычно в сочетании с теми или иными методами предсказания и компенсации движения [2]. С теоретической точки зрения предсказание движения относится

к классу так называемых трудно формализуемых задач, для которых характерна следующая особенность. При формализации любой задачи для уточнения понятия цели явно или неявно должна задаваться некоторая оценочная функция (функция полезности), выражающая степень приближения к цели или устанавливающая порядок предпочтения возможных вариантов достижения цели. Для трудно формализуемых задач полностью определить такую функцию либо невозможно, либо связанные с ней вычисления чрезвычайно громоздки. Указанная особенность характерна для видеокодеков, поддерживающих стандарты MPEG-2, MPEG-4/AVC, H.264. Так, полный перебор векторов движения для видео стандартного разрешения в соответствии с H.264 требует производительности вычислений более 10^{22} операций в секунду. Поэтому на практике обычно применяют упрощенные алгоритмы предсказания движения, которые позволяют снизить сложность вычислений. Однако затраты на их реализацию все равно остаются значительными и составляют 60–80% от всех вычислительных затрат. При этом упрощенные алгоритмы поиска более чем в 3 раза ухудшают эффективность кодирования за счет пропуска так называемых локальных минимумов [3, 4].

Вместе с тем, в контексте декорреляции, видеосигнал как многомерная функция имеет оптимальное разложение по всем своим аргументам. Другими словами, для устранения временной корреляции нет существенных формальных оснований использовать средства, отличающиеся от применяемых для пространственной декорреляции сигнала. Кроме того, большинство практически значимых классов изображений характеризуются экспоненциальной автокорреляционной функцией [5], а для модели стационарного сигнала с такой автокорреляционной функцией асимптотически (при большом обрабатываемом блоке) оптимальным разложением, обеспечивающим максимальную скорость сходимости ряда, является дискретное косинусное преобразование [6]. Результаты сравнительной оценки альтернативных технологий [3] показывают, что трехмерное дискретное косинусное преобразование отсчетов (ЗДКП-технология) обеспечивает примерно полуторакратный выигрыш в степени сжатия видеоинформации при сохранении субъективного качества изображений.

Технология преобразования

С учетом вышеизложенного наиболее рациональным на сегодняшний день представляется распространение видеоконтента по схеме: «исходный видеоматериал → ЗДКП-кодирование → магистральная передача → преобразование магистрального транспортного потока, включающее ЗДКП/2ДКП-транскодирование → локальное распределение → 2ДКП-декодирование → отображение» (рис. 1).

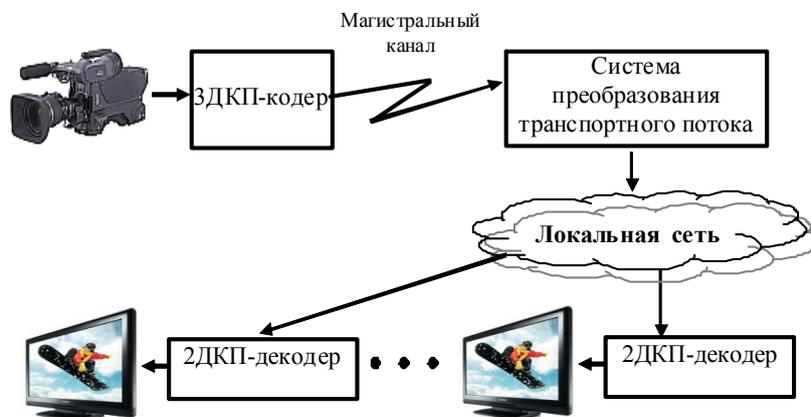


Рис. 1. Распространение видеоконтента с использованием двух технологий компрессии изображений

Для кодирования исходного контента может быть использован российский ЗДКП-кодер, первый СБИС-прототип которого экспонировался на международной выставке NATEXPO-2009 [7]. Для 2ДКП-декодирования применим любой декодер, поддерживающий стандарт MPEG-2. Система преобразования транспортного потока может быть выполнена в виде СБИС класса «система на кристалле» (СнК [8]) и должна содержать ряд сложно-функциональных блоков (СФ-блоков [9]), обеспечивающих:

- анализ магистрального транспортного потока и выделение в нем элементарных ЗДКП-поточков;
- преобразование каждого элементарного ЗДКП-поточка в элементарный поток MPEG-2, т.е. собственно ЗДКП/2ДКП-транскодирование;
- формирование транспортного потока MPEG-2.

В зависимости от структуры магистрального транспортного потока и способов его обработки в состав системы преобразования может входить один или несколько одинаковых СФ-блоков ЗДКП/2ДКП-преобразования.

Тривиальным решением задачи 3ДКП/2ДКП-преобразования является последовательное 3ДКП-декодирование и 2ДКП-кодирование элементарного потока (рис. 2). Однако такое решение характеризуется неоправданно высокой аппаратной и временной сложностью, поскольку оно эквивалентно пятикратному одномерному дискретному косинусному преобразованию отсчетов (тройному обратному в 3ДКП-декодере и двойному прямому в 2ДКП-кодере).

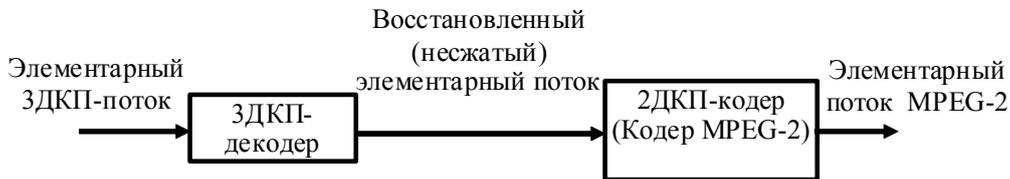


Рис. 2. Тривиальная схема 3ДКП/2ДКП-транскодера

Модифицированное обратное одномерное ДКП

С целью упрощения структуры 3ДКП/2ДКП-транскодера предлагается метод ускоренного преобразования элементарного 3ДКП-потока в элементарный поток MPEG-2, основанный на учете свойства разделяемости многомерного дискретного косинусного преобразования [10] и совмещении операций деквантования/квантования трансформант с их вычислением. Суть предлагаемого метода поясняется схемой на рис. 3 и состоит в следующем.

В результате энтропийного декодирования и обратного сканирования каждой очередной порции элементарного 3ДКП-потока формируется трехмерный массив $F_{3ДКП}^{кг}$, содержащий $8 \times 8 \times M$ квантованных 3ДКП-трансформант $F_{3ДКП}^{кг}(x, y, t)$, где $x = \overline{0, 7}$ и $y = \overline{0, 7}$ – пространственные координаты, а $t = \overline{0, M-1}$ – временная координата трансформанты $F_{3ДКП}^{кг}(x, y, t)$. В типичном случае M фиксировано и равно 8. В более общем случае [3] величина M варьируется в диапазоне от 1 до 8.

Полученные квантованные 3ДКП-трансформанты подвергаются *модифицированному* обратному одномерному ДКП по временной координате t согласно формуле

$$F_{2ДКП}^{кг}(x, y, z) = \sum_{t=0}^{M-1} \gamma(x, y, z, t) \cdot F_{3ДКП}^{кг}(x, y, t) \cdot \cos\left(\frac{(2z+1)\pi t}{2M}\right), \tag{1}$$

где $z = \overline{0, M-1}$, $\gamma(x, y, z, t) = \alpha(t) \cdot \frac{Q_{3ДКП}(x, y, z)}{Q_{2ДКП}(x, y)}$, $\alpha(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}} & \text{при } t = 0, \\ \sqrt{\frac{2}{M}} & \text{при } t \neq 0, \end{cases}$ $Q_{3ДКП}(x, y, z)$ – коэффициент

квантования 3ДКП-трансформанты $F_{3ДКП}(x, y, z)$, $Q_{2ДКП}(x, y)$ – коэффициент квантования 2ДКП-трансформанты $F_{2ДКП}(x, y)$.

Несложно заметить, что используемые в формуле (1) обобщенные коэффициенты $\gamma(x, y, z, t) = \alpha(t) \cdot \frac{Q_{3ДКП}(x, y, z)}{Q_{2ДКП}(x, y)}$ реализуют совмещенную функцию нормировки и переквантования трансформант. Значения этих коэффициентов могут быть рассчитаны заранее, а их количество равно $128M$ ($8 \times 8 \times M$ значений для $t = 0$ и столько же значений для $t \neq 0$). При этом результатом *модифицированного* обратного одномерного ДКП квантованных 3ДКП-трансформант являются M двумерных массивов, каждый из которых содержит 8×8 квантованных 2ДКП-трансформант.

Двумерные массивы квантованных 2ДКП-трансформант, относящиеся к M последовательным видеокадрам типа Intra [2], загружаются в буфер транскодера (см. рис. 3), а затем сканируются и подвергаются энтропийному кодированию в соответствии со стандартом MPEG-2.

Заключение

Следует подчеркнуть, что рассмотренная выше модификация обратного одномерного дискретного косинусного преобразования 3ДКП-трансформант не отличается по своей сложности от обычного одномерного ДКП и позволяет совместить во времени сразу три процедуры преобразования (см. рис. 3), а именно, деквантование 3ДКП-трансформант, вычисление восьми двумерных массивов 2ДКП-трансформант и квантование 2ДКП-трансформант. Дополнительное ускорение процесса 3ДКП/2ДКП-

преобразования может быть достигнуто за счет заблаговременного расчета и хранения в памяти транскодера всех произведений вида $\gamma(x, y, z, t) \cdot \cos\left(\frac{(2z+1)\pi t}{2M}\right)$. Количество таких произведений равно $128M^2$, что при $M=8$ составляет 2^{13} . В случае представления указанных произведений в виде 32-разрядных чисел, объем памяти, потребной для их хранения, составит 32 Кбайт, что по современным меркам вполне приемлемо для СнК средней сложности [11].

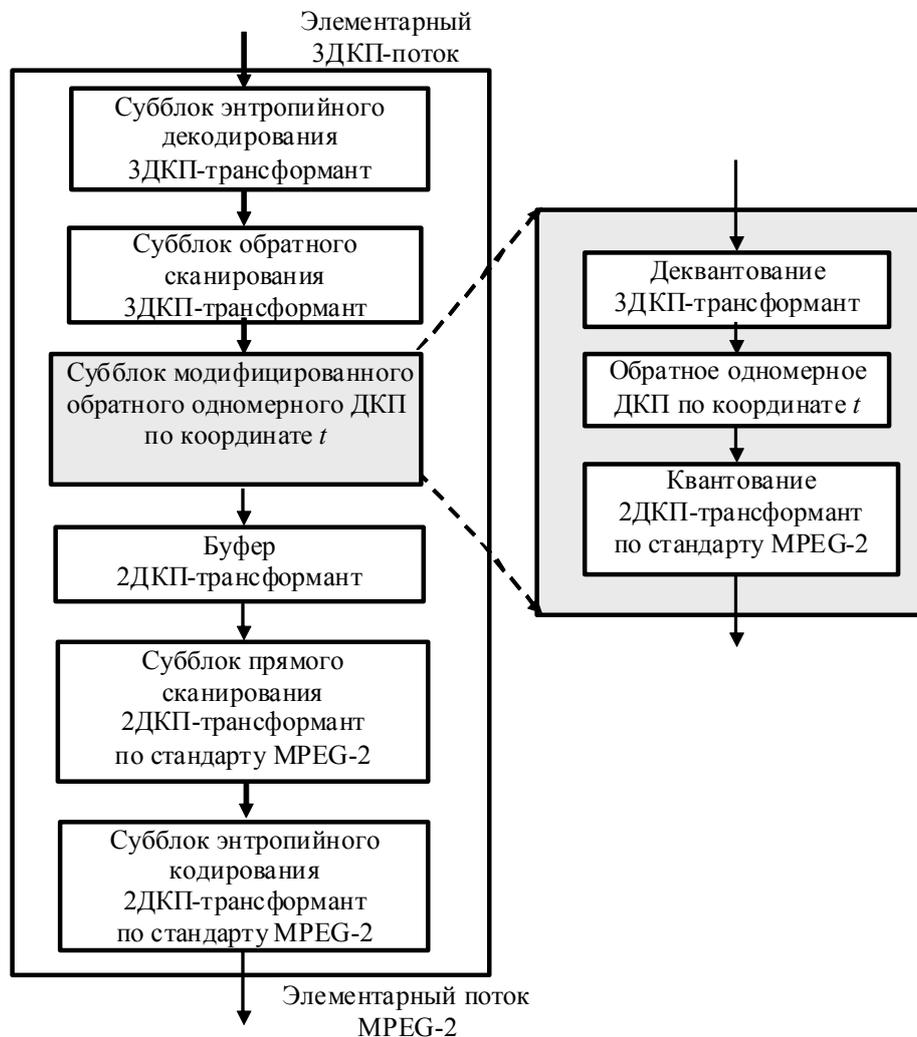


Рис. 3. Структурная схема СБИС преобразования видеоданных

Таким образом, в отличие от тривиального решения (см. рис. 2), предлагаемый СФ-блок транскодера (см. рис. 3) обеспечивает высокоскоростное преобразование элементарного 3ДКП-видеопотока [12, 13] в элементарный поток MPEG-2 без использования трудоемких многомерных преобразований отсчетов. Полученные авторами результаты сравнительной оценки VHDL-моделей показывают, что сложность СФ-блока 3ДКП/2ДКП-транскодера примерно на порядок ниже совокупной сложности 3ДКП-декодера и 2ДКП-кодера, а задержка преобразуемого элементарного потока меньше соответствующей совокупной задержки в 2–3 раза.

Литература

1. Norkin Andrey, Atanas Gotchev, Karen Egiazarian, Jaakko Astola, Low-complexity multiple description coding of video based on 3D block transforms // EURASIP Journal on Embedded Systems. – January 2007. – V. 2007. – № 1. – P. 39–39.
2. Ричардсон Я. Видеокодирование. Н. 264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. – М.: Техносфера, 2005. – 368 с.

3. Umbitaliev A.A., Fahmi Sh. S., Shipilov N. N. et al. A Versatile Real Time Video Codec Based On Three-Dimensional Discrete Cosine Transform. // Ibc 2008, RAI International Congress and Exhibition Centre Amsterdam. The Netherlands. Conference 11–15 September 2008. – P. 386–391.
4. Lee M., Chan R., Adjieroh D. Quantization of 3D-DCT coefficients and scan order for video compression // J. Vis. Commun. Image Represent. – Dec. 1997. – № 8. – P. 405–422.
5. Цифровое кодирование телевизионных изображений / Под ред. Цуккермана И.И. – М.: Радио и связь, 1981. – 240 с.
6. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов: Пер. с англ. / Под ред. И.Б.Фоменко. – М.: Связь, 1980.
7. Шипилов Н.Н., Фахми Ш.С. Свидетельство о государственной регистрации программы. Дискретное косинусное преобразование видеосигналов НИТ VCS 3D-DCT. Заявка 2008613380 от 22.07.2008, пат. 75817, рег. 20.08.08.
8. Немудров В., Мартин Г. Системы на кристалле. Проблемы проектирования и развития. – М.: Техносфера, 2004. – 216 с.
9. Стешенко В., Руткевич А., Гладкова Е. и др. Проектирование СБИС типа «система на кристалле». Маршрут проектирования. Синтез схемы // Электронные компоненты. – 2009. – № 1. – С. 14–21.
10. Raymond Westwater, Borko Furht. Real-Time Video Compression: Techniques and Algorithms. – Kluwer Academic Publishers, 1996. – 164 p.
11. Твердотельная революция в телевидении / Березин В.В., Умбиталиев А.А., Фахми Ш.С., Цыцулин А.К., Шипилов Н.Н. – М.: Радио и связь, 2006. – 312 с.
12. Фахми Ш.С., Зубакин И.А. Адаптивный алгоритм кодирования видеoinформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 1. – С. 49–54.
13. Способ кодирования и декодирования видеoinформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования. № 2375838, заявка № 2008145795 (приоритет от 19.11.2008) Фахми Ш.С., Ибатуллин С.М., Ибатуллин В.Ф., Иванов К.В., Шипилов Н.Н., Умбиталиев А.А., Цыцулин А.К. Зарегистрировано в гос. реестре изобретений РФ 10.12. 2009 со сроком действия 19.11.2028.

- Умбиталиев Александр Ахатович* – ФГУП «НИИ Телевидения», доктор технических наук, профессор, директор, niitv@niitv.ru
- Шипилов Николай Николаевич* – ФГУП «НИИ Телевидения», кандидат технических наук, профессор, зам. директора, niitv@niitv.ru
- Ибатуллин Салех Мансурович* – ФГУП «НИИ Телевидения», инженер, NPK41@LENTA.ru
- Фахми Шакиб Субхиевич* – ФГУП «НИИ Телевидения», кандидат технических наук, доцент, Shakeebf@mail.ru

УДК 004.912

АВТОМАТИЧЕСКОЕ СВОДНОЕ РЕФЕРИРОВАНИЕ НОВОСТНЫХ СООБЩЕНИЙ

С.Д. Тарасов

Приводится обзор современных методов и алгоритмов автоматического сводного реферирования, обосновываются основные недостатки этих методов. Формируются требования к методу, который смог бы преодолеть эти недостатки. Рассматривается разработанный автором метод тематического связанного ранжирования для задач автоматического сводного реферирования. В обоснование эффективности разработанного метода приводятся результаты экспериментальной оценки качества полученных сводных рефератов.

Ключевые слова: сводное реферирование, автоматическое сводное реферирование, сводный реферат, методы и алгоритмы автоматического сводного реферирования.

Введение

Одной из самых серьезных проблем современного общества является лавинообразное увеличение объема информации, которую должен воспринимать, хранить и использовать человек в процессе своей трудовой деятельности. Согласно последним исследованиям, до 2020 г. количество информации и потребности в ней будут расти экспоненциально. В таких условиях особую важность приобретают методы автоматической классификации и реферирования информации, позволяющие знакомить специалистов и других заинтересованных людей с необходимыми им документами, представленными в сжатом виде, но с сохранением смысла.

Классическое реферирование – процесс сжатия текстового документа и получение реферата, в котором сохраняется смысл оригинала. Наибольший интерес представляют обзорные или сводные рефераты, составляемые на некоторое множество документов, содержащие основные положения из этих документов [1]. Использование сводных рефератов вместо первоисточников позволяет эффективнее работать с большими объемами информации. Автоматическое сводное реферирование может быть использовано как эффективный инструмент подготовки аналитических справок и информационных бюллетеней для информационной поддержки лиц, принимающих управленческие решения, а также как средство сжатия текстов, технических описаний, стандартов и регламентов, состоящих из множества документов, информация в которых частично дублируется.

Обзор существующих методов сводного реферирования

Все существующие методы реферирования, как классического (по одному документу), так и сводного (обзорного по набору документов), можно разделить на три направления:

- квазиреферирование (Sentence extraction);
- генерация реферата с порождением нового текста (Abstraction);
- методы, объединяющие предыдущие два подхода.

Квазиреферирование основано на экстрагировании фрагментов документов – выделении наиболее информативных предложений (иногда – фраз и словосочетаний) и формировании из них квазирефератов. Методы генерации реферата с порождением нового текста основываются на выделении из текстов с помощью методов искусственного интеллекта и специальных информационных языков наиболее важной информации и порождении новых текстов, содержательно обобщающих первичные документы. В силу ограниченности на практике методов понимания и синтеза текста на естественном языке и отсутствия необходимой базы семантических словарей достаточного объема и содержания данные методы на сегодняшний день не получили значительного распространения. Большинство современных методов реферирования, имеющих практическую реализацию, относятся к направлению квазиреферирования.

Задача получения сводных рефератов, в которых были бы представлены все основные вопросы, затрагиваемые в каждом документе, но в обобщенном виде без повторений информации, – намного более сложная задача, чем традиционное автоматическое реферирование одного документа, даже очень большого объема. Во-первых, это связано с неизбежной разнородностью формулировок тем документов, на которые, как правило, ориентированы методы автоматического сводного реферирования. Во-вторых, для сводного реферирования отдельной задачей является метод упорядочивания предложений, отобранных для включения в сводный реферат. Предложения могут выбраться из разных документов и в общем случае, как правило, не составляют связный текст.

За рубежом в рамках конференций по проблемам автоматического аннотирования DUC (Document Understanding Conference) и текстового реферирования TSC (Text Summarization Challenge) данному направлению исследований придается очень большое значение. Автоматическое сводное реферирование реализовано в таких системах, как:

- «NewsBlaster» (<http://www.newsblaster.com/>),
- «Ultimate Research Assistant» (<http://ultimate-research-assistant.com>),
- «iResearch Reporter» (<http://iresearch-reporter.com/>),
- новостных порталах «Google News» (<http://news.google.com/>), «Яндекс. Новости» (<http://news.yandex.ru/>), «Рамблер. Новости» (<http://news.rambler.ru>) и др.

На сегодняшний день предложено большое количество различных методов получения сводных рефератов. В традиционных методах реферирования чаще всего используются различные модификации подхода Г. Луна [2], известного с конца 50-х годов XX века, который заключается в отборе предложений с наибольшим весом для включения их в реферат. Вес предложения определяется как сумма частот входящих в него значимых слов (с учетом закона Ципфа). Предложены методы, в которых вместо слов используются словосочетания, концепты тезауруса [3, 4]. К наиболее перспективным можно отнести методы, описывающие связную модель текста документов с помощью формального математического аппарата. Данные методы, как правило, не привязаны к особенностям конкретного языка, не требуют большого количества лингвистических ресурсов.

В результате анализа были сформулированы критические недостатки существующих подходов, которые необходимо исправить для достижения требуемого качества реферирования, а также для расширения сферы применения метода.

- Большинство существующих методов требуют большого количества различных лингвистических ресурсов (толковые, лексические и частотные словари, грамматики, тезаурус). Большая сложность естественных языков не позволяет создать достаточно полные формализованные лингвистические ресурсы для всех языков, необходимые для работы алгоритмов автоматического реферирования.

- Большинство существующих методов ориентировано на особенности конкретного естественного языка.
- В существующих методах либо вообще не рассматривается вопрос о формировании связного текста итогового реферата, либо ему уделяется недостаточное внимание.
- Большинство подходов требуют ручной корректировки со стороны экспертов-лингвистов.
- Существующие средства синтеза текста на естественном языке, используемые рядом методов сводного реферирования, находятся на ранней стадии своего развития и не позволяют использовать данные методы в целях, отличных от научно-исследовательских.
- Ряд алгоритмов требует значительных вычислительных ресурсов, что нежелательно при их использовании в реальных условиях обработки больших объемов данных.

Необходимость учета вышеперечисленных недостатков, а также исследование качества автоматического и ручного сводного реферирования определяют требования к новым эффективным методам и алгоритмам:

- минимальная потребность в лингвистических ресурсах (словарях, грамматиках и т.д.);
- отсутствие привязки к особенностям конкретного естественного языка;
- не только сжатие информации и выделение из текста наиболее значимых предложений, но и формирование из этих предложений связного текста;
- полностью автоматическое порождение текста реферата без необходимости последующей корректировки со стороны эксперта;
- алгоритм должен быть прост с вычислительной точки зрения, чтобы его можно было использовать в реальных задачах автоматического реферирования больших объемов данных в условиях ограниченного времени.

Метод тематического связанного ранжирования

Суть разработанного автором метода тематического связанного ранжирования заключается в отборе предложений из исходных документов, наиболее полно отражающие темы этих документов. Метод имеет следующие особенности.

1. Для предварительного ранжирования предложений документов относительно тем может быть использован любой алгоритм, например, алгоритм Луна. Автором был использован алгоритм Manifold Ranking [5].

2. Темы, которые плохо отражают суть документа, исключаются. По результатам анализа такие темы имеют очень слабую связь с текстом документа.

3. Для обеспечения связности полученного реферата каждое последующее предложение реферата связано с предыдущим некоторой общей темой.

4. Для обеспечения уникальности каждого предложения каждое последующее предложение отражает основную тему предыдущего предложения, а также некоторую новую тему, отличную от предыдущей.

5. Для разрешения анафорических связей предложения, содержащие анафорическую связь, игнорируются, если предыдущее предложение уже не содержится в реферате.

Рассмотрим метод более подробно. Для набора документов $D=\{D_i\}$, где T_i – тема документа D_i вычисляется матрица $\Xi = \{\xi_{ij}\}$, где столбцы этой матрицы соответствуют векторам ранга соответствующих предложений относительно заданных тем. Например, для кластера из двух документов по два предложения, первое и третье из которых используются как темы,

$$\Xi = \begin{matrix} & \xi_{1,1} & \xi_{1,2} & \xi_{1,3} & \xi_{1,4} \\ \xi_{2,1} & \xi_{2,2} & \xi_{2,3} & \xi_{2,4} \\ \xi_{3,1} & \xi_{3,2} & \xi_{3,3} & \xi_{3,4} \\ \xi_{4,1} & \xi_{4,2} & \xi_{4,3} & \xi_{4,4} \end{matrix}, \bar{\Xi} = \begin{matrix} \mathbf{0.9} & \mathbf{0} & \mathbf{0.12} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0.7} & \mathbf{0} & \mathbf{0.33} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0.3} & \mathbf{0} & \mathbf{0.7} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0.21} & \mathbf{0} & \mathbf{0.5} & \mathbf{0} \end{matrix},$$

где $\xi_j = \{\xi_{1,j}, \xi_{2,j}, \xi_{3,j}, \xi_{4,j}\}^T$ – вектор ранжирования предложений кластера относительно предложения j (темы T_j). Если для ранжирования используется метод Manifold Ranking, то ξ_j вычисляется итеративно:

$$\bar{\xi}_j(\mathbf{t} + \mathbf{1}) = \alpha \cdot \mathbf{S} \cdot \bar{\xi}_j(\mathbf{t}) + (1 - \alpha) \cdot \bar{\mathbf{y}}_j,$$

где вектор $\bar{\mathbf{y}}_j = [\mathbf{y}_j^0 \mathbf{y}_j^1, \dots, \mathbf{y}_j^n]^T$, $y_j^j = 1$, и $y_j^i = 0, i \in (1, n), i \neq j$ для всех остальных предложений; α – коэффициент передачи ранга от источника, \mathbf{S} – нормализованная матрица связей между предложениями. Традиционно в качестве матрицы связей использовалась матрица

$$W_{i,j} = \text{Sim}(\bar{x}_i, \bar{x}_j),$$

где $\text{Sim}(\bar{x}_i, \bar{x}_j) = \frac{\bar{x}_i \cdot \bar{x}_j}{\|\bar{x}_i\| \cdot \|\bar{x}_j\|}$, $\bar{x}_i = [tf_0, tf_1, \dots, tf_n]^T$, tf_k – стандартная TF-IDF мера относительной важности

терма t_k . В [5] предложена модификация

$$W = \lambda_1 \cdot W_{\text{inner}} + \lambda_2 \cdot W_{\text{intra}}$$

для учета различных весов связей предложений одного документа и разных документов и

$$S = D^{-1/2} \cdot W \cdot D^{-1/2}$$

для симметричной нормализации полученной матрицы. Автором была предложена и реализована следующая модификация матрицы W :

$$W = \lambda_1 \cdot W_{\text{inner}} + \lambda_2 \cdot W_{\text{intra}} + \zeta \cdot W_{\text{path}},$$

где W_{path} – матрица весов удаленности предложений друг от друга в тексте.

Далее матрица Ξ подвергается симметричной нормализации:

$$\tilde{\Xi} = Z^{-1/2} \cdot \Xi \cdot Z^{-1/2},$$

где Z – диагональная матрица, каждый элемент которой равен сумме элементов соответствующей строки исходной матрицы Ξ . В результате этого строки матрицы $\tilde{\Xi}$ содержат коэффициенты соответствия предложений кластера заданным темам документов:

$$T(x_i) = \sum_{j=1}^n \tilde{\Xi}_{i,j} \cdot T_j.$$

Например, для вышеприведенного кластера $T(x_1) = 0,9 \cdot T_1 + 0,1 \cdot T_3$. Формально это означает, что предложение x_1 отражает 0,9 темы T_1 (собственной темы) и 0,1 темы предложения x_3 (T_3).

Алгоритм формирования связного текста итогового реферата

Для формирования связного текста итогового реферата используется следующий алгоритм.

1. На главной диагонали матрицы Ξ выделяется элемент, имеющий наименьшее значение. Это соответствует теме документа, наиболее сильно связанной с другими предложениями кластера. Эта тема используется как текущая основная тема T_{current} и выносится в заголовок итогового реферата.

2. Главная диагональ матрицы обнуляется.

3. В current-столбце матрицы Ξ определяется элемент $\xi_{i,\text{current}}$ с наибольшим значением. Это соответствует нахождению предложения x_i , наиболее близкого теме T_{current} .

4. Предложение x_i помещается в итоговый реферат.

5. Для уменьшения ранга предложений, которые похожи на x_i , а также тем, которые уже нашли отражение в итоговом реферате, выполняется следующая процедура:

$$\xi_{i,j} = \xi_{i,j} - \omega \cdot \bar{S}_{i,\text{current}} \cdot \xi_{\text{current}}^*,$$

где ω – коэффициент усечения похожих предложений (новизны), а ξ_{current}^* – первоначальное значение вектора-столбца ξ_{current} .

6. В i -ой строке матрицы выполняется поиск элемента ξ_{next} с наибольшим значением. Исходя из

$$T(x_i) = \sum_{j=1}^n \tilde{\Xi}_{i,j} \cdot T_j,$$

выполняется поиск темы T_{next} , отраженной в предложении x_i и следующей по значимости после T_{current} .

7. Процесс переходит на шаг 3 ($T_{\text{current}} = T_{\text{next}}$), пока объем итогового реферата не достигнет требуемой величины.

Предложения, содержащие анафорические связи, игнорируются в том случае, если предыдущее предложение документа не было включено в реферат на предыдущем шаге.

Реализация

Для научно-исследовательских целей автором был разработан программный комплекс для ручного и автоматического сводного реферирования на базе предложенного алгоритма тематического связанного ранжирования и оценки качества полученных сводных рефератов. Кроме данного алгоритма, в системе были реализованы такие алгоритмы, как BasicLine [6], Manifold Ranking [7], модифицированный алгоритм Manifold Ranking [7]. Созданный автором программный комплекс «MDS Evaluation» позволяет решать следующие задачи:

- автоматическое сводное реферирование в широком диапазоне различных параметров для различных нужд;
- ручное сводное реферирование в многопользовательском режиме;
- ручная и автоматическая оценка качества сводного реферирования;
- сравнение эффективности различных алгоритмов и методов.

Оценка

Традиционные методы оценки качества сводного реферирования включают в себя оценку сводного реферата специалистами-лингвистами по ряду критериев. К таким критериям относятся связность полученного текста, краткость (лаконичность), грамматическая правильность, сложность восприятия, содержание.

Однако даже простая ручная оценка качества сводного реферирования по нескольким критериям требует больших объемов человеческих ресурсов (согласно DUC, более 3000 часов работы лингвистов), что является очень дорогим. Одной из наиболее удачных реализаций систем для автоматической оценки качества сводного реферирования можно считать пакет ROUGE [8], используемый в DUC. Набор программ позволяет автоматически рассчитывать различные метрики ROUGE (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation): ROUGE-N, ROUGE-L, ROUGE-W, ROUGE-S, ROUGE-SU. Автором были реализованы алгоритмы оценки ручных и автоматических рефератов с помощью данных автоматических метрик для русского языка.

Для экспериментальной оценки качества работы предложенного автором метода реферирования была проведена ручная и автоматическая оценки получаемых различными методами рефератов, а также было выполнено построение ручных рефератов. В эксперименте приняло участие 13 человек (преподаватели и студенты 5 курса БГТУ «Военмех»). Эксперимент состоял из двух частей – построение ручных рефератов и их оценка. Исходными данными послужили 12 отобранных вручную новостных кластеров различной тематики («Россия», «Происшествия», «Наука и техника», «Спорт», «Культура» и др.) из системы «Google. News» за 2009 год. В рамках построения ручных рефератов участниками эксперимента было построено 156 ручных рефератов: каждый участник составил свой ручной сводный реферат для каждого кластера. В рамках оценки рефератов каждый участник оценил каждый сводный реферат (всего было получено 156 ручных и 2600 автоматических, порожденных различными методами с различными параметрами) по набору формальных критериев. Кроме того, была проведена автоматическая оценка всех сводных рефератов по метрикам ROUGE, для чего были использованы рефераты, построенные вручную. Результаты оценки приведены в таблице. Для вычислений использованы следующие обозначения и параметры:

- BL – усредненное значение для BasicLine (BL-1 – BL-7 – заведомо плохие рефераты [6]);
- МТСП – метод тематического связанного ранжирования, предложенный автором. Параметры: $\alpha=0,9$, $\lambda_1/\lambda_2=0,3$, $\omega=50$, $\zeta=0,1$;
- Manifold – Метод Manifold Ranking [7]. Параметры: $\alpha=0,8$, $\lambda_1/\lambda_2=3$, $\omega=50$;
- Модифицированный Manifold – модифицированный метод Manifold Ranking [7]. Параметры: $\alpha=0,8$, $\lambda_1/\lambda_2=0,3$, $\omega=50$.

	BL	Manifold	Модифицированный Manifold	МТСП	Ручные
Связность	0,42	0,69	0,73	0,81	0,88
Содержание	0,45	0,78	0,78	0,83	0,84
Полнота	0,45	0,78	0,80	0,82	0,84
Общее впечатление	0,41	0,71	0,78	0,85	0,86
ROUGE-1	0,26	0,39	0,40	0,41	0,38
ROUGE-2	0,11	0,18	0,18	0,19	0,17
ROUGE-3	0,07	0,12	0,12	0,12	0,12
ROUGE-L	0,22	0,33	0,34	0,36	0,33

Таблица. Результаты оценки

Заключение

Ручное реферирование, несомненно, имеет ряд преимуществ перед автоматическим, однако, помимо крайне высокой стоимости построения рефератов, имеет и ряд недостатков. К ним относятся невозможность оперативного составления рефератов для очень большого количества исходных документов или документов большого объема; невозможность оперативного составления различных рефератов с заданными свойствами (например, объем реферата); элементы субъективности, так или иначе присутст-

вующие в конечном реферате (каждый эксперт выделяет те или иные значимые элементы и т.д.), и ряд других. Предложенный автором метод открывает возможность для построения сводных рефератов, представляющих связный текст в автоматическом режиме без использования сложных и труднодоступных лингвистических ресурсов и больших вычислительных мощностей. При этом эффективность метода и качество полученных сводных рефератов подтверждаются экспериментально.

Литература

1. ГОСТ 7.9–95. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования. – 2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.standards.ru/document/4155011.aspx> (дата обращения: 01.02.2010).
2. Luhn H.P. The Automatic Creation of Literature Abstracts // IBM Journal. – 1958, April. – P. 159–165.
3. Лукашевич Н.В., Добров Б.В. Автоматическое аннотирование новостных кластеров на основе тематического представления // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. По материалам ежегодной международной конференции «Диалог». Периодическое издание. – 2009. – Выпуск 8 (15).
4. Абрамова Н.Н., Абрамов В.Е. Автоматическое составление обзорных рефератов новостных сюжетов. // Труды 9-ой Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL'2007. – Переславль-Залесский, Россия, 2007.
5. Xiaojun Wan, Jianwu Yang, Jianguo Xiao. Manifold-Ranking Based Topic-Focused Multi-Document Summarization // DUC 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ijcai.org/papers07/Papers/IJCAI07-467.pdf>, своб.
6. Тарасов С.Д. Исследование и оптимизация параметров алгоритма Manifold Ranking на основе метрики автоматической оценки качества обзорного реферирования ROUGE-RUS // Труды XI Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки. Перспективные методы и технологии, электронные коллекции». – Петрозаводск, 2009. – С. 86–93.
7. Тарасов С.Д. Автоматическое составление обзорных рефератов новостных сюжетов // Вестник Балтийского государственного технического университета. – 2008. – № 3. – С. 61–67.
8. Chin-Yew Lin. ROUGE: A Package for Automatic Evaluation of Summaries. Information Sciences Institute // University of Southern California. 2004.

Тарасов Сергей Дмитриевич – Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, ассистент, tarasov_sd@mail.ru

УДК 51.76

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСТАНОВКИ КАВА-ФИЛЬТРА НА ГЕМОДИНАМИКУ КРОВЕНОСНОЙ СИСТЕМЫ

Ю.А. Иванов, Т.К. Добросердова

Моделирование кровеносной системы является обширной областью для научной деятельности и включает в себя множество аспектов. В этом смысле вопрос о строении сосуда и его реакции на деформацию логично рассматривать отдельно. На основе биологических особенностей строения ткани реализуется волоконная модель эластичной стенки сосуда, идея которой была сформулирована в работах Чарльза Пескина [6]. Подробно рассматривается калибровка модели с помощью специальных входных данных – уравнений состояния сосуда. Отдельная часть работы посвящена интеграции волоконной модели эластичности и глобальной модели кровообращения. Взаимодействие моделей дает возможность исследования влияния установки модельного кава-фильтра на гемодинамику.

Ключевые слова: тромбоз, трансмуральное давление, уравнение состояния сосуда, кава-фильтр.

Введение

В настоящее время для описания динамики кровообращения создан ряд численных гидродинамических моделей, в основе которых лежит система уравнений в частных производных. Огромный интерес для науки представляет исследование влияния на гемодинамику различных факторов, в частности, некоторых болезней. Тромбоз – смертельно опасное осложнение, при котором происходит закупорка сосудов тромбами. Борьба с ней входит в число главных проблем медицины. Одним из методов профилактики эмболии является установка в вены специальных имплантатов – кава-фильтров. Однако в этом случае возможно не только формирование областей замедленного кровотока, но и повреждение стенки сосуда или ее разрыв в случае неправильного подбора размеров конструкции или ее установки. Все это приводит к повторному тромбообразованию и эмболии легочной артерии не только тромбами, но и обломками кава-фильтра (в случае его разлома). Таким образом, крайне важно отследить влияние имплантата на гемодинамику. В работе [1] с помощью гидродинамической модели глобальной циркуляции крови исследовано возмущение кровотока в случае попадания в кава-фильтр тромба посредством уменьшения эффективного сечения вены. Мы же исследуем влияние установленной конструкции, модифицировав одно из уравнений основной системы с помощью волоконной модели эластичной стенки сосуда. Данная технология позволяет рассчитывать силы, возникающие в стенке деформированного сосуда (в том числе при наличии кава-фильтра), фиксировать изменения его формы при повышении или понижении кровяного давления.

Модель глобального кровообращения

Предполагается, что кровь – вязкая несжимаемая жидкость с постоянной температурой, протекающая по сети эластичных трубок. Трубки связаны в четыре графа, задающих артериальную и венозную часть большого и малого кругов кровообращения. Введем следующие обозначения: t – время; x – координата по длине сосуда; S – площадь поперечного сечения сосуда; u – скорость кровотока, осредненная по поперечному сечению; ρ – плотность крови; p – трансмуральное давление, равное разности давлений в сосуде и того, которое оказывают на него окружающие ткани; c – скорость распространения малых возмущений; \hat{S} – площадь поперечного сечения при $p = 0$; d – диаметр трубки; μ – коэффициент вязкости крови. Для каждого сосуда будут выполняться следующие уравнения:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S(u)}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right)}{\partial x} = \psi(t, x, S, u); \quad (2)$$

$$p = \rho c^2 f(S), \quad (3)$$

где $f(S) = \begin{cases} \exp(S\hat{S}^{-1} - 1) - 1, & S > \hat{S} \\ \ln(S\hat{S}^{-1}), & S \leq \hat{S} \end{cases}$. Выражения (1), (2) отражают законы сохранения массы и количества

движения соответственно. Функция ψ задает вязкое трение. Уравнение (3) учитывает эластичные свойства стенок сосудов. В настоящей работе будет использоваться гидродинамическая модель, основанная на системе (1)–(3) [2].

Решения задачи, полученные на каждом ребре каждого из четырех графов отдельно, необходимо сшить, задав граничные условия на концах сосудов. В случае, когда концевая вершина принадлежит точке стыковки вен с венами или артерий с артериями, используются закон Пуазейля и закон сохранения массы:

$$p_k(S(t, x)) - p_i(t) = \varepsilon_k R_k S_k(t, x) u_k(t, x),$$

$$\sum_{k=1}^m \varepsilon_k S_k(t, x) u_k(t, x) = 0,$$

где k – номер сосуда, p_i – давление в точке стыковки; $\varepsilon_i = -1$ и $x = 0$, если сосуд выходит из этой точки, $\varepsilon = 1$ и $x = l$ в противном случае (l – длина сосуда); R – сопротивление, которое преодолевает жидкость, протекающая через эту область; m – количество сосудов, имеющих данный узел своим концом, суммирование проводится по всему множеству. Замыкается система уравнением совместности – условием, накладываемым характеристическими кривыми, идущими внутрь области интегрирования. Поскольку размеры артериол и венул очень малы, их моделирование невозможно и не необходимо, поэтому в узлах стыковки артерий с венами используется такая же система граничных условий, как и в предыдущем случае, с той лишь разницей, что сопротивление R берется значительно больше, заменяя поколения сосудов, которыми приходится пренебречь. В настоящей работе используется динамическая модель четырехкамерного сердца [2]. Система уравнений, лежащая в ее основе, дополненная условиями равенства давлений и потоков в соответствующих предсердиях (желудочках) и во входящих (выходящих) в сердце венах (артериях), а также уравнениями совместности в концевых точках этих же сосудов, определяет систему граничных условий в узлах сопряжения сосудистых деревьев с сердцем.

Рассмотрим более подробно уравнение состояния (3). Поскольку при постановке задачи о глобальном кровотоке предполагается, что сосуды – эластичные трубки, то каждому из них необходимо сопоставить особый параметр, отражающий эти свойства. Таким параметром является скорость распространения волн давления малой амплитуды по упругой трубке (в наших обозначениях – c). В зависимости от нее график уравнения состояния, представляющий собой S -образную кривую, имеет разный угол наклона. Точка перегиба в нем соответствует переходу от круглой формы сечения сосуда к эллипсообразной.

Функция $f(S)$ выведена эмпирически [3], поэтому никак не отражает воздействий на сосуд. Попытаемся получить новое уравнение состояния, используя волоконную модель эластичной стенки.

Модель эластичной стенки сосуда

Волоконная модель эластичной стенки сосуда основывается на биологических особенностях ее строения [6]. Она представляет собой систему переплетенных волокон, обладающих упругими свойствами.

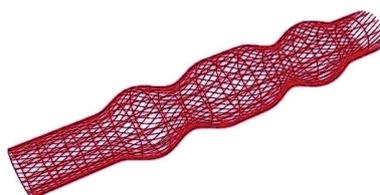


Рис. 1. Волоконная модель эластичной стенки

Существует три типа волокон: эластические, гладкомышечные и коллагеновые. Модули Юнга первых двух примерно равны $3 \cdot 10^5$ Па и в данной модели будут объединены в один класс. Эластические волокна образуют достаточно густую сеть, особенно на внутренней оболочке стенки. Они создают эластическое напряжение, которое противодействует кровяному давлению, растягивающему сосуд. Коллагеновые волокна имеют модуль Юнга $1 \cdot 10^8$ Па. Сеть, образованная ими в средней и наружной оболочках, оказывает сопротивление растяжению большее, чем сеть эластических волокон [4]. Коллагеновые волокна располагаются относительно свободно в стенке сосуда, иногда даже образуя складки, так что противодействие внутреннему давлению оказывают лишь тогда, когда сосуд уже растянут до определенного состояния. Модельная реализация описанной выше структуры представляет собой набор нескольких пар спиралевидных (геликовидных) волокон, закрученных вдоль стенки в противоположных направлениях (рис. 1). Каждая группа определяется своим набором параметров – модулем упругости, скоростью реакции на деформацию, степенью закрученности и т.д. Также в модель могут быть введены и другие типы волокон, например, кольцевидные, опоясывающие сосуд по всей длине, или прямолинейные (лучевидные).

Определим силы упругости, возникающие вследствие деформации волокна, заданного набором точек. Пусть s – переменная Лагранжа, определяющая расстояние вдоль волокна от данной точки до некоторой начальной; $\bar{X}(s, t)$ – вектор-функция, описывающая положение физической точки с лагранжевой

координатой s ; t – время; T – напряжение деформированного волокна. Предположим, что напряжение подчиняется нелинейному обобщению закона Гука:

$$T = \sigma \left(\left| \frac{\partial \bar{X}}{\partial s} \right| \right) = T^* \left(\left| \frac{\partial \bar{X}}{\partial s} \right| - 1 \right), \quad (4)$$

где T^* – коэффициент упругости волокна. Тогда локальная сила упругости \bar{f} , действующая со стороны стенки, выражается следующим образом:

$$\bar{f} = \frac{\partial}{\partial s} (T \bar{\tau}); \quad (5)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\partial \bar{X}}{\partial s} \bigg/ \left| \frac{\partial \bar{X}}{\partial s} \right|, \quad (6)$$

где $\bar{\tau}$ – направление касательной в точке волокна.

Осуществим дискретизацию уравнений (4)–(6). Пусть N_b – количество расчетных точек на волокне; X_k – координата k -ой точки в трехмерном пространстве, где $k = 1, \dots, N_b$; ΔS – расстояние между соседними точками волокна в недеформированном состоянии. Предполагаем, что ΔS будет одинаково для точек, принадлежащих однотипным волокнам. Далее в соответствии с формулами (4), (6) дискретизируем T и τ следующим образом:

$$T_{k+1/2} = \sigma(|X_{k+1} - X_k| / \Delta S) = \frac{|X_{k+1} - X_k|}{\Delta S} - 1; \quad (7)$$

$$\tau_{k+1/2} = \frac{X_{k+1} - X_k}{|X_{k+1} - X_k|}. \quad (8)$$

Дискретная сила упругости в k -ой точке определяется по формуле

$$f_k = \frac{T_{k+1/2} \tau_{k+1/2} - T_{k-1/2} \tau_{k-1/2}}{\Delta S}. \quad (9)$$

Реализуем модель эластичной стенки в виде двух наборов спиралевидных волокон с двумя различными коэффициентами упругости и параметрами, характеризующими степень закрученности волокон. Первый набор, моделирующий связки эластина, реагирует на любую деформацию, второй, моделирующий коллагеновые волокна – только если деформация превышает определенный порог. Тогда калибровка модели сводится к отысканию пяти параметров: T_e , T_c – коэффициенты упругости двух наборов волокон; ΔL_e , ΔL_c – «шаги» спирали; R_c – параметр, определяющий степень деформации, до которой второй набор волокон (коллагена) не вносит вклада в реакцию упругой стенки сосуда.

Рассмотрим следующую задачу. Пусть в модель на вход подаются данные – уравнение состояния некоторого сосуда. Оно может быть задано как дискретный набор данных (полученных в результате эксперимента), так и в виде некоторой функции, описывающей уравнение состояния реального сосуда. Задача – подобрать коэффициенты так, чтобы уравнение состояния нашей модели было наиболее близко в смысле L_2 -нормы к целевой функции на заданном отрезке, т.е. на определенном диапазоне изменения сечения сосуда. Под уравнением состояния модели и под целевой функцией в случае дискретных входных данных будем понимать кусочно-линейную интерполяцию. Предположим, что у нас есть только один набор волокон, описываемый двумя параметрами T и ΔL . Требуется отыскать их значения, чтобы наилучшим образом удовлетворить целевой функции $P(S)$ на отрезке $[S_0, S_1]$, и где $P(S_0)=0$. Функция $P(S)$ для реальных сосудов имеет экспоненциальный характер роста на данном промежутке. Заметим, что уравнение состояния модели имеет линейный характер при малых значениях параметра Δl и усиливает выпуклость при его увеличении. Параметр T будет играть роль нормирующего коэффициента. Основываясь на этих замечаниях и применяя метод золотого сечения, строим итерационный алгоритм, минимизирующий L_2 -норму ошибки на заданном отрезке. Отыскание совокупности описанных ранее пяти параметров модели – T_e , T_c , ΔL_e , ΔL_c и R_c – основывается на тех же принципах. Если рассматривать растяжение сосуда при $S < 2S_0$, исследование используемого алгоритма калибровки модели для различных уравнений состояния показало, что норма ошибки составляет не более 4% от нормы приближаемой функции $P(S)$.

Влияние кава-фильтра на гемодинамику

Рассмотрим процесс установки кава-фильтра в сосуд. Предположим, что имплантант представляет собой два соосно-соединенных металлических конуса, совмещенных вершинами и образованных чередующимися лучами с крючками или фиксаторами на концах, которыми он прикрепляется к стенкам вены (см., например, фильтр «Зонтик» компании «Комед» [5]). При этом фильтр не фиксирует сечение сосуда в этой точке – оно может меняться в зависимости от кровяного давления. В предположении, что это давле-

ние компенсируется реакцией стенки вне зоны крепления фильтра, с помощью модели эластичной стенки получим новую зависимость $p(S, \xi)$, где ξ – расстояние от данной точки до места имплантации (рис. 2).

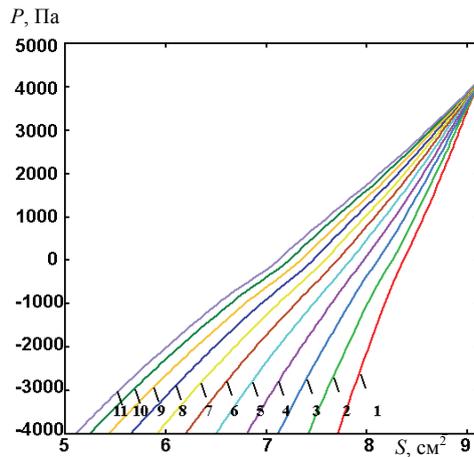


Рис. 2. График модифицированного уравнения состояния: $p(S, \xi)$, где $\xi = 0$ (кривая 1); 0,5 (2); 1 (3); 1,5 (4); 2 (5); 2,5 (6); 3 (7); 3,5 (8); 4 (9); 4,5 (10); 5 (11).

Пусть кова-фильтр стоит в середине сосуда, длина которого равна 10 см, диаметр 3 см, скорость распространения малых возмущений 350 см/с. Тогда на его концах уравнение состояния практически совпадает с первоначальной зависимостью (3). Чем ближе к точке установки имплантанта, тем больше угол наклона графика: как при повышении, так и при понижении трансмурального давления сосуд меньше подвержен деформации из-за близкого расположения упругого кова-фильтра, препятствующего изменению формы. Кроме того, поскольку имплантант растягивает вену, при равенстве внутреннего и внешнего давлений на стенку при движении от ее концов к середине площадь поперечного сечения становится больше.

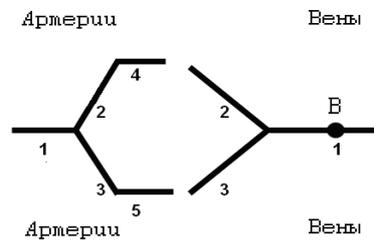


Рис. 3. Упрощенная схема кровеносной системы

Используем модифицированное уравнение состояния в глобальной модели кровообращения. Проведем вычислительный эксперимент на упрощенной схеме кровеносной системы (рис. 3). Венозная часть большого круга будет представлена тремя ветвями, артериальная – пятью (таблица). Артериальные ветви 4, 5 соединяются с венами 2, 3 соответственно. В артериях 4, 5 берется нарочито большое сопротивление, чтобы сохранить правдоподобие модели – благодаря нему компенсируются поколения сосудов, которыми мы пренебрегли в упрощенной схеме.

тип	номер	l , см	d , см	R , Па·с/мл	c , см/с
Арт.	1	10	2	115	500
Арт.	2	20	1,6	600	700
Арт.	3	20	1,6	600	700
Арт.	4	5	2	10000	1000
Арт.	5	5	2	10000	1000
Вен.	1	10	3	25	350
Вен.	2	20	2,4	110	400
Вен.	3	20	2,4	110	400

Таблица. Параметры модели

Смоделируем установку каво-филтра в точку В, расположенную в середине вены 1, на расстоянии 5 см от точки соединения с сердцем. В этом случае наблюдается естественный пульсирующий периодический режим течения крови. Продолжительность сердечного цикла составляет 1 с.

Рассмотрим параметры гемодинамики в несколько моментов времени: в начале сердечного цикла, а также через 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 с после. При установке каво-филтра характер течения крови существенно меняется только в вене с имплантатом. В остальных сосудах возможен небольшой сдвиг показателей на константу, причем, чем больше сосуд удален от места установки каво-филтра, тем меньше ощущается его влияние. Это объясняется тем, что организм стремится сгладить внешние воздействия. В вене 1, куда произведена имплантация, наблюдается замедление кровотока (рис. 4). Это происходит вследствие расширения сосуда: благодаря упругости каво-филтра вена все время находится в распертом состоянии (рис. 5), а поток жидкости сохраняется прежним. Давление крови практически линейно по длине вены и существенных изменений не претерпевает (рис. 6).

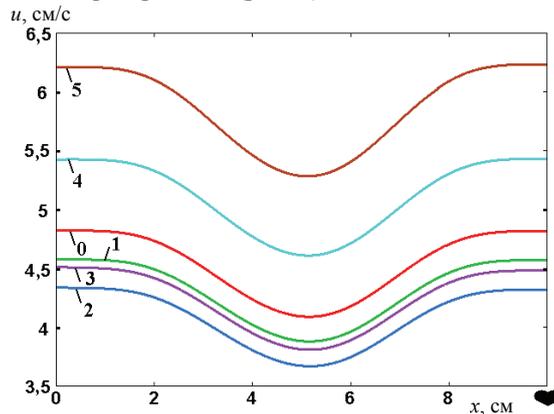


Рис. 4. Величина скорости течения крови вдоль сосуда через 0 (линия 0); 0,1 (1); 0,2 (2); 0,3 (3); 0,4 (4); 0,5 с (5) после начала сердечного цикла

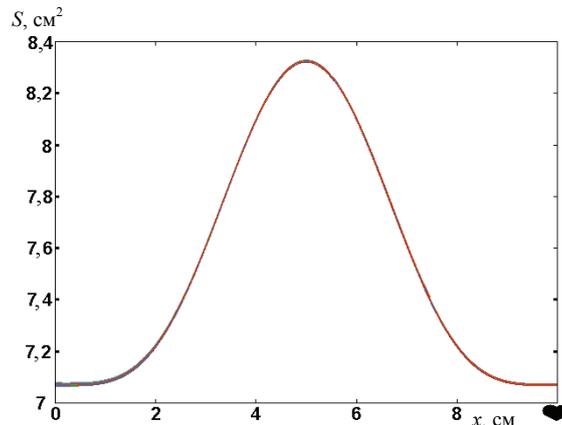


Рис. 5. Площадь сечения вдоль сосуда

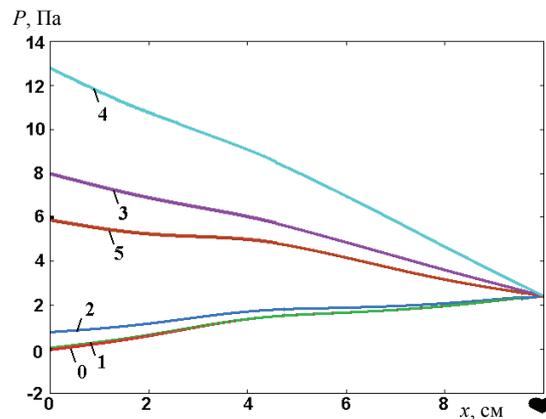


Рис. 6. Величина давления по длине сосуда через 0 (линия 0); 0,1 (1); 0,2 (2); 0,3 (3); 0,4 (4); 0,5 с (5) после начала сердечного цикла

Таким образом, кава-фильтр типа «Зонтик» вызывает замедление кровотока в области его установки. Сильное уменьшение скорости течения становится причиной нового тромбообразования, поэтому необходимо задавать имплантату такие параметры, чтобы он был «прозрачен» для кровотока. С помощью объединения моделей глобальной циркуляции крови и эластичной стенки сосуда становится возможным наблюдение за влиянием кава-фильтров с различными параметрами на гемодинамику, а также определение их оптимальных размеров.

Работа поддержана РФФИ, грант 08-01-00159, 09-01-00115, а также программой Президиума РАН 21-П «Фундаментальные науки в медицине».

Литература

1. Есикова Н.Б., Мухин С.И., Соснин Н.В., Фаворский А.П., Хруленко А.Б. Математическое моделирование течения крови с кава-фильтрами. Препринт. – М.: МАКС Пресс, 2004.
2. Холодов А.С., Симаков С.С. Численное исследование содержания кислорода в крови человека при низкочастотных воздействиях // Математическое моделирование. – 2008. – Т. 20. – № 4. – С. 87–102.
3. Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. Механика кровообращения / Под ред. С.А. Регирер, В.М. Хаютина. – М.: Мир, 1981.
4. Rosar M.E., Peskin C.S. Fluid Flow in Collapsible Elastic Tubes: A Three-Dimensional Numerical Model // New York J. Math. – 2001. – № 7. – P. 281–302.
5. Савельев В.С., Гологорский В.А., Кириенко А.И. и др. Флебология / Под ред. В.С. Савельева – М.: Медицина, 2001.
6. Cheng Tu and Charles Peskin. Stability and Instability in the Computation of Flows with Moving Immersed Boundaries: A Comparison of Three Methods // SIAM J. SCI. STAT. COMPUT. – November 1992. – Vol. 13. – № 6. – P. 1361–1376.

Иванов Юрий Александрович

– Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, студент, yura-vtm@yandex.ru

Добросердова Татьяна Константиновна

– Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, студент, DobroserdovaTK@gmail.com

УДК 519.711

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТУБЕРКУЛЕЗА

В.Н. Леоненко, К.К. Логинов

В работе рассматриваются подходы, позволяющие повысить быстродействие моделирующей программы для индивидуум-ориентированной модели распространения туберкулеза. Описывается процесс оптимизации вычислительных алгоритмов, а также использование распределенных вычислений на основе системы MONC и параллельных вычислений с применением технологии OpenMP. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, эпидемиология, распределенные вычисления, параллельное программирование.

Введение

Одним из инструментов исследований закономерностей распространения туберкулеза является метод математического моделирования. В настоящее время разработан широкий класс детерминированных моделей, описывающих распространение туберкулеза и контроль за этим заболеванием [1, 2]. Вместе с тем, практически отсутствуют модели, опирающиеся на стохастический подход и индивидуально-ориентированное описание неинфицированных, инфицированных и больных индивидуумов.

Индивидуум-ориентированные модели позволяют детально провести формализацию принципов передачи и развития туберкулеза и исследовать динамику заболеваемости туберкулезом от различных факторов. Одними из первых в этом направлении являются модели, представленные в работах [3, 4]. В работе [3] предложена стохастическая модель в форме высокоразмерной системы рекуррентных уравнений с дискретным временем, учитывающая зависимость развития заболевания от возраста индивидуумов. Модель, построенная в работе [4], имеет следующие отличительные свойства: используется непрерывное время, продолжительность пребывания индивидуумов в различных стадиях болезни задается с помощью случайных величин с произвольными законами распределения, вероятность контактов индивидуумов считается пропорциональной произведению численностей когорт.

В данной работе рассматривается стохастическая модель [5], созданная на основе дифференциальной модели динамики туберкулеза [2]. В индивидуум-ориентированной модификации модели, в отличие

от предшествующих работ [3, 4], учитывается влияние продолжительности болезни на вероятность гибели индивидуумов. Введение индивидуальных параметров привело к тому, что объем обрабатываемых данных повысился и время, затрачиваемое на моделирование динамики популяции, существенно возросло. Основной целью данной работы является рассмотрение подходов, позволяющих повысить быстродействие моделирующих программ путем оптимизации исходного алгоритма и более эффективного применения имеющихся компьютерных мощностей и вычислительных технологий.

Описание модели

Кратко опишем особенности модификаций модели, рассматриваемых в данной работе (полное формальное описание приведено в [5]).

Базовая модель. В популяции выделяется шесть когорт населения: восприимчивые индивиды (S), инфицированные индивидуумы (L), невыявленные больные индивидуумы без бактериовыделения (D), невыявленные больные индивидуумы с бактериовыделением (B), выявленные больные индивидуумы без бактериовыделения (D_0) и выявленные больные индивидуумы с бактериовыделением (B_0). Система уравнений модели имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 x_S(t) &= \hat{x}_S(t) - u_{S,L \cup D}(t) + f_1(t), \\
 x_L(t) &= \hat{x}_L(t) + u_{S,L}(t) + u_{D,L}(t) + u_{D_0,L}(t) - u_{L,D}(t) + f_2(t), \\
 x_D(t) &= \hat{x}_D(t) + u_{S,D}(t) + u_{L,D}(t) + u_{B,D}(t) - u_{D,L}(t) - u_{D,B}(t) - u_{D,D_0}(t) + f_3(t), \\
 x_B(t) &= \hat{x}_B(t) + u_{D,B}(t) - u_{B,D}(t) - u_{B,B_0}(t) + f_4(t), \\
 x_{D_0}(t) &= \hat{x}_{D_0}(t) + u_{D,D_0}(t) + u_{B_0,D_0}(t) - u_{D_0,B_0}(t) - u_{D_0,L}(t) + f_5(t), \\
 x_{B_0}(t) &= \hat{x}_{B_0}(t) + u_{B,B_0}(t) + u_{D_0,B_0}(t) - u_{B_0,D_0}(t) + f_6(t), t = 0, 1, \dots
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Система (1) дополняется начальными данными при $t = 0$. Здесь $x_Y(t)$ – численность индивидуумов когорты Y в момент времени t , $\hat{x}_Y(t)$ – численность индивидуумов когорты Y , доживших от момента времени $t-1$ до момента времени t , случайные величины вида $u_{Y,Z}(t)$ описывают переход из когорты Y в когорту Z в течение промежутка времени $(t-1, t]$, $Y, Z \in \{S, L, D, B, D_0, B_0\}$. Слагаемые $f_i(t)$, $i = \overline{1,6}$ задают приток населения в соответствующие когорты за промежуток времени $(t-1, t]$.

Для описания процессов инфицирования индивидуумов и спонтанной активации болезни используется схема, предложенная в работе [3]. Инфицирование происходит при одновременном посещении больными и здоровыми индивидуумами мест возможного контакта. Считается, что за единицу времени индивидуумы из когорт B, B_0 посещают в совокупности $\xi_t^{(B)}$ и $\xi_t^{(B_0)}$ мест соответственно, где $\xi_t^{(B)} = \sum_{i=1}^{x_B(t)} \Psi_{it}^{(B)}$, $\xi_t^{(B_0)} = \sum_{i=1}^{x_{B_0}(t)} \Psi_{it}^{(B_0)}$, $\Psi_{it}^{(B)} \geq 0$, $\Psi_{it}^{(B_0)} \geq 0$ – взаимно независимые, одинаково распределенные случайные величины, не зависящие от $x_B(t)$, $x_{B_0}(t)$, причем $E(\Psi_{it}^{(B)}) = r > 0$, $E(\Psi_{it}^{(B_0)}) = k \cdot r$, $k \in (0; 1)$. Вероятности того, что индивидуумы из когорт S, L посетят одно из этих мест, обозначим через $\lambda_S \in (0; 1)$ и $\lambda_L \in (0; 1)$ соответственно. Вероятности заражения индивидуумов после контакта с больным индивидуумом обозначим через $\delta_S \in (0; 1)$ и $\delta_L \in (0; 1)$ соответственно. Тогда вероятности того, что индивидуум из конкретной когорты S, L будет инфицирован в течение суток, при фиксированном значении ξ_t задаются следующими формулами: $\mu_t^{(S)} = 1 - (1 - \lambda_S \delta_S)^{\xi_t^{(B)} + \xi_t^{(B_0)}}$, $\mu_t^{(L)} = 1 - (1 - \theta_L)(1 - \lambda_L \delta_L)^{\xi_t^{(B)} + \xi_t^{(B_0)}}$, где θ_L – вероятность спонтанной активации болезни для индивидуумов когорты L . Данные величины определяют количество инфицированных на интервале $(t-1, t]$.

Индивидуум-ориентированная модель. В популяцию вводятся когорты R и R_0 , которые используются для описания индивидуумов, находящихся в состоянии ремиссии. Считается, что в когорту R поступают самоизлечившиеся индивидуумы из когорты D , а в когорту R_0 – вылеченные индивидуумы из когорты D_0 . Переходы индивидуумов из D и D_0 в L заменяются на переходы из D в R и из D_0 в R_0 . Предполагается, что больные индивидуумы после перехода в состояние ремиссии остаются инфицированными и существует риск повторного развития заболевания. Это означает, что возможны переходы индивидуумов из R в D и из R_0 в D_0 .

Для индивидуумов когорт D, B, D_0, B_0, R и R_0 вводится параметр $\Delta_x(t) = \max\{0, \pi_x(t) - \sigma_x(t)\}$, $t = 0, 1, 2, \dots$, отражающий влияние продолжительности болезни индивидуума на вероятность его дожития от момента времени $t-1$ до t . Здесь $\pi_x(t) = \gamma_D \omega_{D,x}(t) + \gamma_B \omega_{B,x}(t) + \gamma_{D_0} \omega_{D_0,x}(t) + \gamma_{B_0} \omega_{B_0,x}(t)$ – величина,

отражающая негативное влияние заболевания на продолжительность жизни индивидуума x , $\sigma_x(t) = \delta_R \omega_{R,x}(t) + \delta_{R_0} \omega_{R_0,x}(t)$ – величина, отражающая снижение эффекта воздействия заболевания на продолжительность жизни индивидуума x за счет его пребывания в состоянии ремиссии, $\gamma_D, \gamma_B, \gamma_{D_0}, \gamma_{B_0}, \delta_R, \delta_{R_0}$ – положительные константы, $\omega_{D,x}(t), \omega_{B,x}(t), \omega_{D_0,x}(t), \omega_{B_0,x}(t), \omega_{R,x}(t), \omega_{R_0,x}(t)$ – продолжительности пребывания индивидуума x в соответствующих когортах до момента времени t включительно. Вероятность дожития от момента времени $t-1$ до t для индивидуума x из когорты H при заданной $\Delta_x(t)$ равна $\rho_{H,x}(t) = \rho_H e^{-\Delta_x(t-1)}$, $H \in \{D, B, D_0, B_0, R, R_0\}$ (в отличие от базовой модели, где $\rho_{H,x}(t) \equiv \rho_H = \text{const}$).

Повышение быстродействия работы моделирующих программ

Рассмотрим далее способы ускорения работы моделирующих программ, позволяющих исследовать динамику численностей когорт в зависимости от параметров модели.

Оптимизация вычислительных алгоритмов. Рассмотрим индивидуум-ориентированную модификацию модели. Для всех вычислительных алгоритмов, использованных в моделирующей программе, справедливо следующее.

1. Когорты S и L полностью характеризуются своими численностями.
2. Динамика когорт S и L моделируется розыгрышем общей численности этих когорт на каждом шаге с помощью заданных вероятностей дожития индивидуумов.

Основные сложности возникают при моделировании динамики когорт, члены которых обладают индивидуальными параметрами.

Пусть $T = \{D, B, D_0, B_0, R, R_0\}$. Наиболее простым является итеративный вариант моделирования всех взаимодействий, выглядящий следующим образом.

Алгоритм № 1.

1. Для каждой когорты множества T создается список, содержащий индивидуальные параметры членов когорты.
2. Дожитие и переходы индивидуумов когорт множества T **в течение суток** (т.е. в течение одной итерации цикла) разыгрываются для каждого из этих индивидуумов последовательно в процессе прохода по спискам параметров.

Заметим, что вследствие линейности процессов дожития и переходов между когортами для индивидуумов когорт D, B, D_0, B_0 судьбу каждого такого индивидуума можно разыгрывать независимо. Тогда алгоритм моделирования принимает следующий вид.

Алгоритм № 2.

1. Для когорт R и R_0 создаются списки, содержащие индивидуальные параметры членов когорт.
2. Процессы дожития и переходов индивидуумов когорт R и R_0 **в течение суток** разыгрываются для каждого из этих индивидуумов последовательно путем прохода по спискам параметров.
3. Процессы дожития и переходов индивидуумов когорт D, B, D_0, B_0 **вплоть до их гибели или выздоровления** разыгрываются для каждого индивидуума с помощью функции розыгрыша судьбы отдельно взятого индивидуума. В процессе розыгрыша принадлежность индивидуума к заданной когорте в заданный момент времени регистрируется в массиве численностей индивидуумов множества T . В случае перехода рассматриваемого индивидуума в состояние ремиссии значение его параметра передается в качестве выходного параметра функции и помещается в массив параметров индивидуумов когорт R и R_0 .

Формальное описание алгоритмов №№ 1, 2 для базовой модели и алгоритма № 1 для индивидуум-ориентированной модели приведено в работе [5].

Функция розыгрыша судьбы отдельно взятого индивидуума реализована в двух вариантах.

- (а) Итеративный вариант. Судьба индивидуума разыгрывается итеративно, с шагом в одни сутки (на каждом шаге с помощью метода Монте-Карло моделируется, погибнет ли индивидуум на данном шаге, и если нет, то перейдет ли он в другую когорту).
- (б) Вариант со скачками. На основании значений вероятностей гибели индивидуума и перехода его в другую когорту разыгрывается момент ближайшей смены статуса рассматриваемого индивидуума, после чего внутри функции происходит «скачок» во времени до этого момента с одновременным пересчетом значения индивидуального параметра.

Для сравнения быстродействия работы моделирующих программ проводился вычислительный эксперимент (табл. 1). Расчеты производились для двух наборов параметров на персональном компьютере Intel Core2 Quad 2,66 ГГц, объем оперативной памяти – 3 Гб. Отрезок моделирования – 5500 суток. Получаем, что моделирующая программа, выполненная на основе алгоритма №2 и функцией розыгрыша

судьбы в варианте (б), производит расчеты с первым набором параметров примерно на 70% быстрее, а со вторым набором – на 55% быстрее по сравнению с исходным вариантом алгоритма.

Заметим, что реализация розыгрыша судьбы индивидуума в виде отдельной функции также облегчает модификацию программного кода при необходимости изменения законов протекания инфекции (в перспективе возможна реализация выбора из нескольких модулей протекания инфекции и схем заражения для разных типов заболеваний).

	Время работы на наборе № 1, с	Время работы на наборе № 2, с
Алгоритм №1	1611,39	2468,01
Алгоритм №2 (а)	970,14	1636,69
Алгоритм №2 (б)	478,43	1111,56

Таблица 1. Быстродействие моделирующей программы с разными алгоритмами

Распределенные вычисления с использованием системы MONC

Система MONC [6] (сокращение от Monte Carlo), разработанная М.А. Марченко (Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск), является универсальной высокопроизводительной системой параллельных вычислений для методов Монте-Карло на базе сети персональных компьютеров. Она распределяет независимые копии задания по персональным компьютерам в сети, отдает команды на их исполнение, следит за ходом выполнения заданий и по завершению выполнения заданий выполняет копирование и усреднение файлов с результатами расчетов.

Был проведен вычислительный эксперимент с использованием системы MONC на комплексе из четырех компьютеров с ОС Windows XP. Исполняемым приложением была модификация моделирующей программы для индивидуум-ориентированной модели, доработанная с учетом требований, предъявляемых системой (см. [6]). Производилось нахождение оценок математических ожиданий численностей когорт по ста реализациям для двух различных наборов параметров (отрезок моделирования – 5500 суток). Сначала измерялось время выполнения расчетов на каждом из компьютеров по отдельности, затем общее количество моделируемых реализаций разделялось по компьютерам пропорционально их быстродействию. После окончания расчетов на всех машинах система MONC усредняла полученные данные и сохраняла результат.

Таким образом, в данном случае запуск модели с помощью системы MONC на комплексе из четырех компьютеров позволяет сократить время выполнения задания примерно на 66% для обоих наборов параметров по сравнению с запуском на самом быстром из имеющихся компьютеров (O94-11).

Сетевое имя	Процессор	Оперативная память	Время работы на наборе № 1, с	Время работы на наборе № 2, с
O94-31	Intel Pentium 4, 3,2 ГГц	512 Мб	5156,7	17307,2
O91-01	AMD Athlon 64 x2 Dual Core Processor 5200+, 2,61 ГГц	1 Гб	4958,23	16755,6
O94-09	Intel Pentium 4, 3 ГГц	512 Мб	5826,1	19228,4
O94-11	Intel Core 2 Duo E7200, 2,53ГГц	1 Гб	3679,15	12031,9

Таблица 2. Характеристики компьютеров, задействованных для расчетов с использованием системы MONC

Сетевое имя	Набор № 1		Набор № 2	
	Кол-во реализаций	Время выполнения расчетов, с	Кол-во реализаций	Время выполнения расчетов, с
O94-31	23	1216	23	3885
O91-01	24	1233	24	4073
O94-09	21	1183	20	3850
O94-11	32	1171	33	4019
Итого	100	1233	100	4073

Таблица 3. Результаты вычислительного эксперимента по применению системы MONC

Параллельные вычисления с использованием технологии OpenMP

Технология OpenMP (Open Multi-Processing) представляет собой набор директив компилятора, функций и переменных окружения, позволяющих создавать на базе последовательных программ многопоточные приложения, предназначенные для выполнения на многопроцессорных системах с единой па-

мятью. Важным достоинством OpenMP является то, что исходная программа не переписывается заново, а модифицируется добавлением в текст соответствующих директив [5].

К моменту написания статьи реализована поддержка технологии OpenMP в моделирующей программе для базовой модели с алгоритмом №1. Проводился вычислительный эксперимент с двумя наборами параметров, расчеты выполнялись на компьютере Intel Core 2 Duo E7400 2.8ГГц с объемом оперативной памяти 2 Гб. Отрезок моделирования – 5500 суток.

Количество потоков	Время работы на наборе № 1, с	Время работы на наборе № 2, с
1	129,968	191,093
2	71,578	99,515

Таблица 4. Результаты испытаний программы с поддержкой технологии OpenMP

Проведение вычислений в одном потоке соответствует выполнению последовательной версии моделирующей программы. Таким образом, применение технологии OpenMP при выполнении программы на двухъядерном процессоре дает экономию времени в 45% для первого набора параметров и 48% для второго набора параметров по сравнению с последовательным вычислением.

Заключение

В работе были описаны подходы, которые позволили существенно увеличить скорость работы моделирующей программы. Это особенно актуально в связи с прогнозируемым усложнением модели (введением возрастной структуры в популяции и реализацией более детального механизма заражения). Также важной задачей является освоение моделирования на высокопроизводительных ЭВМ с распределенной памятью, в связи с чем планируется адаптировать программу под распределенные вычисления на основе технологии MPI.

Авторы благодарят своего научного руководителя профессора Н. В. Перцева (ОФ ИМ им. С.Л. Соболева СО РАН) за постановку задачи и обсуждение результатов работы.

Литература

1. Авилов К. К., Романюха А. А. Математические модели распространения и контроля туберкулеза (обзор) // Математическая биология и биоинформатика. – 2007. – Т. 2. – № 2. – С. 188–318.
2. Perelman M.I., Marchuk G.I., Borisov S.E., et. al. Tuberculosis epidemiology in Russia: the mathematical model and data analysis // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. – 2004. – V. 19. – № 4. – P. 305–314.
3. Перцев Н.В., Романюха А.А., Касаткина В.С. Нелинейная стохастическая модель распространения туберкулеза // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 1.2 (31). – С. 246–250.
4. Перцев Н.В., Пичугин Б.Ю. Индивидуум-ориентированная стохастическая модель распространения туберкулеза // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2009. – Т. 12. – № 2(38). – С. 97–110.
5. Pertsev N.V., Leonenko V.N. Stochastic individual-based model of spread of tuberculosis // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. – 2009. – V. 24. – № 4. – P. 341–360.
6. Марченко М.А. Комплекс программ MONC для распределенных вычислений методом Монте-Карло. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://osmf.sssc.ru/~mam/monc_rus.htm, своб.
7. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP. – М.: Изд-во МГУ, 2009.

Леоненко Василий Николаевич

– Омский филиал Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН, аспирант, VNLeonenko@yandex.ru

Логинов Константин Константинович

– Омский филиал Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН, аспирант, kloginov85@mail.ru

УДК 004.9

**КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ОБУЧЕНИЯ ИЗ ИЗБЫТОЧНОГО СОДЕРЖАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ**

В.Н. Васильев, Л.С. Лисицына, А.А. Шехонин

Предложена концептуальная модель для двухэтапного извлечения результатов обучения (РО) и их компетенций из избыточного содержания образования. Описана базовая методика для построения моделей иерархии РО и образовательного процесса на их основе. Рассмотрены эффективные приемы для применения базовой методики, позволяющие уточнять деятельность в компетенциях на основе макротраекторий между РО и проводить поэтапное формирование элементарных (неделимых) РО. Показана связь предложенных моделей со структурой и планом реализации модульных образовательных программ.

Ключевые слова: концептуальная модель, результаты обучения, компетенции, образовательные траектории.

Введение

Преподаватели вузов приступают к разработке новых образовательных программ по подготовке бакалавров, магистров и специалистов в соответствии с Федеральными государственными образовательными стандартами (ФГОС) нового поколения. В основе разработки – принципиально новый компетентностный подход к образованию, который должен переориентировать образовательный процесс с возможностей и желаний преподавателей на ожидания студентов и их потенциальных работодателей – ожидания того, что будет знать и уметь делать на практике выпускник университета из сферы своей профессиональной деятельности. Применение компетентностного подхода к образованию базируется на понятиях результата обучения (РО) и компетенции, которые призваны стать новым языком описания целеполагания образовательных программ – языком, понятным и прозрачным для всех и, прежде всего, для обучающихся. В этой связи такое образование получило название студентоцентрированного. Оно предполагает активное включение студентов в выбор образовательных траекторий обучения, что требует от разработчиков образовательных программ не только владения языком РО и компетенций, но и умения формулировать РО и оперативно управлять проектированием различных вариативных траекторий обучения на их основе.

Данная статья является обобщением научно-методической работы авторов [1–4] с целью познакомить читателей с подходом к проектированию модульных компетентностно-ориентированных образовательных программ. Главным звеном подхода является концептуальная модель для извлечения из избыточного содержания образования РО, для идентификации которых используются компетенции выпускника. Следует заметить, что данный подход хорошо формализован и может быть использован для автоматизации управления процессами сбора, систематизации и накопления РО, а также для моделирования образовательного процесса в условиях динамически изменяющихся требований со стороны работодателей к знаниям, умениям, навыкам (ЗУН) и компетенциям выпускника, что является основным принципом ФГОС к разработке новых образовательных программ.

Требования к разработчикам РО

Разработчик РО обязан, прежде всего, хорошо владеть содержанием образования в предметной области обучения, понимать тенденции его развития. Это – необходимое, но не достаточное условие успешности его работы. Разработчик РО должен владеть методикой сбора, систематизации и обновления формулировок основных идентификаторов РО – компетенций.

Среди разработчиков РО можно выделить две группы. В первую группу входят разработчики компетентностных моделей выпускников (КМВ). Сюда относятся ведущие преподаватели выпускающих кафедр, которые в сотрудничестве с потенциальными работодателями выпускников, занимающих приоритетное положение на рынке труда, разрабатывают универсальные (общекультурные) и профессиональные компетенции, которые должны быть сформированы на высоком профессиональном уровне у выпускников вуза. Для них должен быть характерен высокий профессионализм в сфере профессиональной деятельности выпускников. Ко второй группе относятся разработчики РО в предметных областях базовой подготовки выпускников различных направлений подготовки из числа высококвалифицированных преподавателей математики, физики, информатики и т.п. Характерной особенностью таких разработчиков РО является их способность извлекать вариативные РО и управлять образовательными траек-

ториями обучения студентов в соответствии с их уровнем образования, профилем подготовки и характеристиками учебной нагрузки.

Разработчики РО обеих групп должны взаимодействовать между собой с целью проектирования и разработки компетентно-ориентированных образовательных программ по подготовке выпускников. Языком взаимодействия и сотрудничества выступают при этом РО и компетенции выпускника. Компетенции из КМВ определяют направленность формирования РО в предметных областях базовой подготовки выпускников, а РО базовой подготовки, в свою очередь, служат основой для формирования компетенций КМВ.

Основные свойства компетенций

Для разработки концептуальной модели чрезвычайно важно понимание свойств компетенций выпускника вуза. Прежде всего, следует иметь в виду, что компетенции нельзя навязать, невозможно сформировать их вне в обход целей, намерений, интересов самого человека. Это позволяет говорить о важности личностной – мотивационно-поведенческой основы, наряду с когнитивной и деятельностной составляющими компетенции. С учетом сказанного становится понятным, что компетенции могут быть сформированы и оценены только в соответствующей образовательной среде, обеспечивающей активные технологии обучения, преподавания и оценивания с опорой на самостоятельную работу обучающегося.

Отметим далее наиболее важные и существенные свойства компетенций.

1. *Двойственность компетенций.* Компетенция является основным идентификатором РО, а РО являются языком для их формулировки. В этом и состоит диалектическая связь РО и их компетенций.
2. *Многослойность компетенций.* Процесс извлечения неразрывно связан с детализацией (уточнением) основных идентификаторов РО – компетенций. В процессе извлечения происходит декомпозиция РО вплоть до элементарных (неделимых) РО, а реализация образовательных программ должна быть направлена на синтез (соединение) таких РО в соответствии с полученной иерархией РО [2]. Иерархия РО определяет и иерархию компетенций (рисунок): ЗУНы элементарных РО при соединении позволяют сформировать соответствующую компетенцию, которая, в свою очередь, соединяясь с другими ЗУНами, формирует другие компетенции выпускника.
3. *Динамичность компетенций.* Эволюция любой компетенции базируется на динамической совокупности ЗУН. Изменение ЗУН связано с двумя факторами. Первый фактор определяется постоянным развитием предметной области обучения, например, предметная область для подготовки IT-специалистов изменяется ежегодно. Второй фактор определяется изменением требований рынка труда к выпускникам данного профиля, что, в свою очередь, приводит к необходимости ежегодной актуализации их КМВ. Новый пакет компетенций КМВ во многом определяет направленность подготовки выпускников, в том числе на базовом этапе.
4. *Формирование компетенций по спирали.* Процесс формирования компетенций носит спиралевидный характер. Их формирование на каждом этапе эволюции происходит с учетом актуальной совокупности ЗУН.

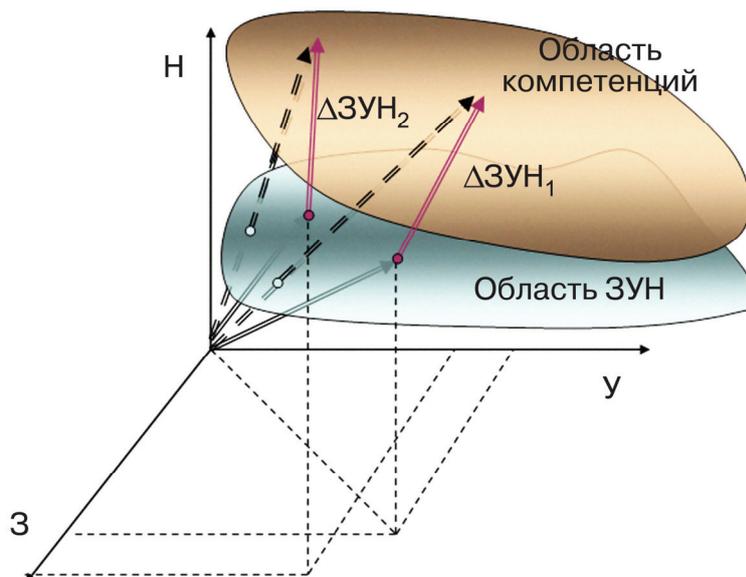


Рисунок. Процесс формирования компетенций

Методика извлечения РО из избыточного содержания образования

Для сбора, систематизации и накопления формулировок компетенций используется методика поэтапной детализации компетенций [2, 4], в ходе которой поочередно уточняются *объекты и виды деятельности*, а также *характеристики содержания* для их освоения (подходы, способы, методы, приемы для их формирования и т.п.). Целью детализации является получение формулировок компетенций, идентифицирующих элементарные (неделимые) РО, дальнейшая детализация которых приводит к потере смысла РО. В процессе детализации могут быть получены следующие три вида формулировок [4]:

- *компетенции* выпускника, понятные и прозрачные всем, в том числе и самому обучаемому, для идентификации видов и объектов деятельности в задачах подготовки выпускника; такие компетенции используются для идентификации РО более высокого уровня, чем элементарные;
- *содержательные компетенции* выпускника, понятные и прозрачные преподавателям и специалистам данной сферы профессиональной деятельности, для отбора содержания образования, используемого для формирования компетенции; такие компетенции используются для идентификации вариативных элементарных РО;
- *компетенции, устанавливающие требования к ЗУН* выпускника, понятные и прозрачные преподавателям и специалистам данной предметной области обучения; такие компетенции отдельно не идентифицируют РО, но в совокупности определяют требования для отбора содержания, необходимого и достаточного для формирования соответствующего элементарного РО.

Компетенция выпускника, определяющая отдельную задачу по его подготовки, имеет вид
КОМПЕТЕНЦИЯ: = <деятельность> <объект деятельности>. (1)

Понятие <деятельность> задается глагольной группой (разрабатывать, применять в организации производства и т.п.) в соответствии с видами деятельности, а <объект деятельности> – именной (базы данных, корпоративные информационные системы и т.п.).

Для систематизации и накопления компетенций выпускника следует чередовать уточнение видов и объектов деятельности, исходя из некоторой исходной формулировки компетенции выпускника. Детализацию следует проводить до тех пор, пока не будет наблюдаться переход с того, *какой* результат будет достигнут в процессе подготовки, на то, *каким образом* его можно достичь. В общем случае структура записи каждой *i*-й компетенции выпускника после ее однократной детализации выглядит следующим образом:

$$\text{КОМПЕТЕНЦИЯ } (i): = \left\{ \begin{array}{l} <деятельность (i)> (<объект деятельности (i, 1)> \\ & + <объект деятельности (i, 2)> + \dots) \\ & \text{или} \\ <деятельность (i,1)> + <деятельность (i, 2)> + \dots \\ &) <объект деятельности (i)>. \end{array} \right. \quad (2)$$

Содержательные компетенции выпускника служат выражением мнения о том, каким образом (способом) следует решать поставленную задачу подготовки, чтобы достичь запланированные РО. Формулировки содержательных компетенций могут быть вариативными. В этом случае каждый вариант содержательной компетенции будет идентифицировать свой элементарный РО, отличающийся от других альтернативных РО только способом его формирования. Структура записи содержательных компетенций имеет следующий вид:

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ КОМПЕТЕНЦИЯ: = <деятельность>
 <объект деятельности> <способ формирования>. (3)

Здесь <деятельность> – глагольная группа, выбранная из перечня соответствующего вида профессиональной деятельности; <объект деятельности> – объект, на который направлена данная профессиональная деятельность; <способ формирования> характеризует содержание образования, на основе которого будет сформирована эта компетенция. Наличие вариативных элементарных РО характеризует образовательный потенциал разработчиков и повышает их конкурентоспособность на рынке образовательных услуг.

Детализация компетенции каждого элементарного РО приводит к формулировкам компетенций, определяющих требования к ЗУН, которые являются необходимыми и достаточными для формирования данной компетенции у обучаемого. Формулировки требований должны быть сделаны в формате компетенций (1)–(3). Перечень требований к ЗУН является своеобразным фильтром для отбора компетентно-ориентированного содержания модульных образовательных программ. Рассмотрим далее несколько эффективных приемов по использованию данной методики.

Установление макротраекторий между РО

Образовательная траектория в образовательном пространстве, структурированном на основе РО и их компетенции, представляет собой упорядоченный набор элементарных РО, формирование которых обеспечивает целостный образовательный процесс по подготовке выпускников. Образовательные траек-

тории строятся по модели образовательного процесса в виде план-графа [2], в котором каждое состояние моделирует элементарный РО, а ориентированные гипердуги – причинно-следственные связи между ними. Требования к подготовке выпускников устанавливаются КМВ и определяют перечень целевых состояний, а уже сформированные к настоящему моменту РО – перечень начальных состояний образовательного процесса. Образовательная траектория является результатом композиции минимальных путей в план-графе, ведущих из начальных к целевым состояниям образовательного процесса [2].

При извлечении РО из избыточного содержания образования детализация деятельности выпускника (2) может быть установлена с помощью макротраекторий между РО. *Макротраектория* – это причинно-следственная связь между совокупными РО из различных предметных областей обучения. Макротраектория является основным средством организации сотрудничества между разработчиками РО обеих групп. Понятие <деятельность> в формулировке компетенции (1) на основе макротраекторий выглядит следующим образом:

<деятельность>: = <глагольная группа> [для (КОМПЕТЕНЦИЯ_11, КОМПЕТЕНЦИЯ_12, ...)
[на основе (КОМПЕТЕНЦИЯ_21, КОМПЕТЕНЦИЯ_22, ...)]. (4)

Здесь <глагольная группа> – из формулировки данной компетенции (1); группа (КОМПЕТЕНЦИЯ_11, КОМПЕТЕНЦИЯ_12, ...) является обязательной частью формулировки и описывается компетенциями, формирование которых следует за освоением данной компетенции; группа (КОМПЕТЕНЦИЯ_21, КОМПЕТЕНЦИЯ_22, ...) является необязательной частью формулировки и описывается компетенциями, формирование которых предшествует освоению данной компетенции.

Проиллюстрируем использование макротраекторий на примере детализации компетенции по формированию способности применять информационные технологии (ИТ); эта компетенция встречается практически во всех КМВ. Для уточнения деятельности (3) могут быть использованы следующие формулировки:

- применять для подготовки отчетных материалов (рефератов, эссе, отчетов по курсовым работам, отчетов по научно-исследовательской работе, выпускных квалификационных работ);
- применять для разработки простейших цифровых ресурсов (изображений, фотогалерей для Web, сайтов, интерактивных иллюстрационных материалов, тестов) [4];
- применять для разработки сложных цифровых ресурсов (трехмерных статических и динамических объектов, видеороликов, виртуальных лабораторий) и т.п.

Тогда отбор ИТ на следующем шаге детализации этой компетенции будет выполнен в соответствии с указанными видами деятельности. Например, для формирования способности разрабатывать простейшие цифровые ресурсы могут быть отобраны следующие ИТ: Adobe Photoshop CS3, Adobe Flash CS3, HTML-редактор Dreamweaver CS3, язык гипертекстовой разметки текста HTML 4.01, расширенный язык разметки текста XML 1.0, язык JAVASCRIPT 1.7, подход AJAX. Перечисленные выше технологии определяют перечень содержательных компетенций (3), которые позволяют запланировать 25 элементарных РО по формированию способности применять различные ИТ для разработки простейших ЦР [4].

Установление уровней формирования РО

Процесс формирования элементарных РО можно дозировать, разбивая его на этапы. Для этого можно использовать дескриптор уровней формирования элементарных РО в данной предметной области обучения. Дескриптор устанавливает количество уровней (этапов) формирования РО и описывает общие требования к ЗУН для каждого уровня. Это позволит в дальнейшем управлять разработкой образовательных траекторий, включая туда только то, что необходимо и достаточно для формирования компетенций выпускника из КМВ. Например, дескриптор уровней формирования способности применять ИТ для разработки ЦР [4] описывает требования к ЗУН на трех уровнях: начальный (вводный), базовый и углубленный.

При построении план-графа [2] вершина, моделирующая такой элементарный РО, расщепляется на множество линейно упорядоченных вершин, а ее прообразы делятся между вершинами полученного множества на основе причинно-следственных связей с вершинами истока гиперребра, ведущего к расщепляемой вершине.

Модель иерархии РО и ее связь со структурой модульной образовательной программы

Модель иерархии РО [2], построенная в ходе детализации компетенций, во многом определяет структуру модульных образовательных программ и их частей (модульных дисциплин, образовательных модулей и их тем). Каждая тема образовательного модуля является неделимой частью образовательной программы и должна соответствовать одному элементарному РО или его части, если при разработке РО используются уровни для формирования РО. Компетенции, определяющие требования к ЗУН для формирования данного элементарного РО, являются фильтром для отбора компетентностно-

ориентированного содержания темы. Вариативные элементарные РО определяют вариативные темы программы. Образовательный модуль дисциплины соответствует одному или нескольким вариативным РО более высокого уровня, чем элементарный РО, а модульная дисциплина – совокупному РО соответствующей предметной области обучения.

План-граф и его связь с планом реализации модульной образовательной программы

Для реализации модульной образовательной программы разработка учебного плана строится на основе его модели – минимального модульного плана (ММП) [2, 4]. ММП является результатом построения по план-графу образовательной траектории для реализации КМВ. Образовательная траектория представляет собой подгиперграф, полученный на основе композиции минимальных путей, ведущих в плане-графе к целевым элементарным РО, установленным по КМВ [2, 4].

Заключение

Изложенная в статье концептуальная модель служит для извлечения РО и их компетенций из избыточного содержания образования для построения модульных компетентностно-ориентированных образовательных программ по подготовке выпускников вуза. Извлечение РО и компетенций проводится в два этапа. На первом этапе производится структурирование образовательного пространства. Результатом первого этапа являются модели иерархии РО и образовательного процесса в виде план-графа. Полученные модели могут оказаться избыточными с точки зрения установленных характеристик учебной нагрузки для реализации модульных образовательных программ по подготовке выпускников. Поэтому на втором этапе необходимо строить образовательные траектории, содержащие необходимый и достаточный перечень РО для реализации КМВ. Полученный на втором этапе ММП является моделью образовательного процесса по подготовке выпускников вуза конкретного профиля и уровня образования.

Литература

1. Васильев В.Н., Лисицына Л.С. Концепция сетевой информационно-образовательной технологии для разработки результатов образования // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. – 2005. – Вып. 23. Высокие технологии в оптических и информационных системах. – С. 149–156.
2. Лисицына Л.С. Теория и практика компетентностного обучения и аттестаций на основе сетевых информационных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 147 с. (см. электронную версию книги <http://ito-center.ifmo.ru/publication.html>).
3. Шехонин А.А., Тарлыков В.А., Мусалимов В.М. Проектирование компетентностно-ориентированного содержания подготовки на модульном уровне образовательных программ // Межвуз. науч.-метод. конф. «Проблемы разработки учебно-методического обеспечения перехода на двухуровневую систему в инженерном образовании». – М.: Издат. дом МИСиС, 2008. – С. 184–191.
4. Лисицына Л.С. Методология проектирования модульных компетентностно-ориентированных образовательных программ. Методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 50 с.

<i>Васильев Владимир Николаевич</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ректор, rector@mail.ifmo.ru
<i>Лисицына Любовь Сергеевна</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, lisizina@mail.ifmo.ru
<i>Шехонин Александр Александрович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, профессор, проректор, shehonin@aco.ifmo.ru

УДК 93/94:67-05

ЗАРОЖДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В ДОРЕВОЛЮЦИОННОЙ РОССИИ (ФАБРИКА ОПТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ И.Я. УРЛАУБА)

Н.Е. Каменская

Рассматриваются проблемы, связанные с возникновением оптического производства в России в конце XIX – начале XX вв. в условиях развития пореформенной экономики. Эти проблемы не нашли должного освещения в литературе. Статья рассчитана на всех, кто интересуется историей зарождения отечественной оптической промышленности.

Ключевые слова: оптическое производство, промышленное развитие, фабрика оптических инструментов И.Я. Урлауба.

Введение

Процесс зарождения оптического производства в России в конце XIX – начале XX вв. имел большое значение для развития всей отечественной экономики. Однако исследование этой нарождающейся отрасли промышленности дореволюционной России не нашло, на наш взгляд, достаточного освещения в отечественной науке, хотя изучение общих проблем становления капиталистической экономики Российской империи в указанный период невозможно без анализа развития отдельных отраслей производства.

Оптическая отрасль играет очень важную роль в таких сферах развития общества, как оборона, здравоохранение, охрана окружающей среды и т.д. Кроме того, она способна обеспечить прогресс во многих областях народного хозяйства. В статье, написанной к 15-летию Государственного оптического института, директор института Д.С. Рождественский охарактеризовал культурное значение оптической промышленности: «Распространенность оптики – признак высоты культуры. Микроскоп, фотографический аппарат, зрительная труба или бинокль всегда отмечали культурную семью. Оптическая промышленность – самая высокая промышленность и потому, что наиболее тонкая и трудная, и потому, что она быстрее всего ведет нас через микроскоп и зрительную трубу к культуре, подлинному научному материализму и к рассеянию предрассудков. Народы славятся именно своей оптической индустрией, как бы она ни была ничтожна по своим размерам» [1, С. 25].

Зарождение оптической промышленности в России

Каков же был уровень оптической промышленности в России до революции? В конце XIX – начале XX века Россия не обладала собственной оптико-механической промышленностью. Практически все приборы приходилось ввозить из-за рубежа. В нескольких городах страны действовали небольшие оптические мастерские, занимавшиеся преимущественно «отверточной сборкой» из иностранных деталей и узлов.

В справочной литературе дореволюционной России «оптическими» назывались предприятия, занимавшиеся изготовлением физических, оптических, математических, геодезических приборов, а также хирургических инструментов и медицинских принадлежностей. Большинство таких предприятий России находилось в Москве и Петербурге. К сожалению, большинство этих предприятий сейчас известно только узкому кругу ученых, хотя инструменты, выпускавшиеся этими фирмами, по своему качеству не уступали, а в некоторых случаях даже превосходили изготавливаемые за границей. Многие из них были отмечены на международных выставках высшими наградами и призами.

В статье сделана попытка показать краткую историю одной из крупных частных оптических фирм, не только копировавших иностранные инструменты, но и выпускавших свои разработки.

Фабрика оптических инструментов И.Я. Урлауба

Иван Яковлевич (Теодор Иоганн) Урлауб, баварский подданный католического вероисповедания, сын преподавателя Санкт-Петербургских гимназий и Коммерческого училища, родился в 1856 г. в Санкт-Петербурге. Он окончил Училище св. Екатерины в Санкт-Петербурге, в 1870–74 г.г. изучал оптическое дело, работая в петербургских оптических магазинах, а в 1874–77 г.г. учился за границей для усовершенствования своих теоретических и практических знаний в области физической оптики. Уже тогда он наметил свою специализацию – глазные инструменты для исследования глаз, определения рефракции и предупреждения слепоты. В 1878 г. И.Я. Урлауб (рис. 1) стал петербургским купцом 2-й гильдии.



Рис. 1. И.Я. Урлауб

В 1877 г. в Петербурге была открыта фирма И.Я. Урлауба. Она носила название «Фабрика оптических инструментов». Мастерская и магазин размещались на Невском проспекте, дом 44 (рис. 2), где жил и сам И.Я. Урлауб (о жизни И.Я. Урлауба интересно написал в статье «Богач, прошедший сквозь игольные уши» С. Севастьянов [2, С. 11]). Сейчас в здании, где располагались фирма и магазин, находится большое количество разнообразных коммерческих фирм.



Рис. 2. Дом 44 на Невском пр. (фото начала XX в.)

Позднее И.Я. Урлауб открыл еще два магазина: по адресу Б. Морская, 27 (рис. 3) и Гороховая, 19 (рис. 4). Фирма специализировалась на изготовлении глазных инструментов для исследования глаз, определения рефракции и предупреждения слепоты. Она изготавливала офицерские бинокли, зрительные приборы, очки, пенсне, лорнеты, лупы, микроскопы и особенно специализировалась на изготовлении различных принадлежностей для исследования глаз, определения зрения и предупреждения слепоты. Очень скоро фирма приобрела известность, выпуская оригинальные глазные инструменты, приборы и аппараты в соответствии с рекомендациями ведущих специалистов по офтальмологии. В 1890 г. при мастерских был организован отдел для исправлений и переделок микроскопов всех систем и конструкций. В это же время фирма И.Я. Урлауба стала выпускать карманные наборы линз, составленные лейб-окулистом, заведующим офтальмологическим отделением Санкт-Петербургского окружного военного

госпиталя Н.И. Тихомировым, профессором офтальмологии Клинического института великой княгини Елены Павловны Г.А. Донбергом, а также дешевые наборы линз для госпиталей и лазаретов, разработанные Н.А. Поляковым.



Рис. 3. Дом 27 на Б. Морской ул. (современное фото)



Рис. 4. Дом 19 на Гороховой ул. (современное фото)

Фирма И.Я. Урлауба принимала участие в российских и международных промышленных и медицинских выставках. Неоднократно фабрика удостоивалась значительных наград, которые следует здесь упомянуть: в 1899 г. в Петербурге на врачебно-гигиенической выставке при 3-м съезде общества русских врачей получила Похвальный отзыв «за оптические инструменты новейших конструкций собственного производства»; в 1890 г. в Берлине на выставке при 10-м Международном Медицинском конгрессе – Почетный диплом за новые конструкции приборов для офтальмологии; в 1892 г. в Лондоне – Почетную медаль за экспонаты по фотометрической оптике; в 1893 г. в Петербурге на Всероссийской гигиенической выставке – Большую золотая медаль за безукоризненную шлифовку оптических стекол. Выставку посетили император Александр III и императрица Мария Федоровна. И.Я. Урлауб давал пояснения относительно шлифовки оптических стекол для научных целей и преподнес Марии Федоровне лорнеты соб-

ственного изготовления. В 1894 г. в Петербурге на выставке при 10-м Съезде общества русских врачей фирма получила Похвальный отзыв за микроскопы и аппараты по электротерапии; в 1895 г. в Петербурге – денежную награду и диплом от Военного министерства за экспонаты, имеющие значение для Военного ведомства – бинокли, барометры, готовальни, компасы и дальномеры [3, С.11].

Фабрика оптических инструментов И.Я. Урлауба стала поставщиком многих военных, гражданских и частных учреждений. И.Я. Урлауб стал «оптиком-механиком»: Императорского клинического института Великой княгини Елены Павловны, Императорской военно-медицинской академии, Попечительства Императрицы Марии Александровны о слепых, Мариинского приюта увечных воинов, Николаевского военного госпиталя, Русского общества охранения народного здоровья, Петербургского общества русских врачей, Императорского института экспериментальной медицины, Морского военного госпиталя в Кронштадте и многих других учреждений Петербурга.

В 1896 г. в Нижнем Новгороде состоялась крупная Всероссийская промышленно-художественная выставка. В выставке приняло участие большое количество фирм России. Выставленные фирмой экспонаты преимущественно касались шлифовки оптических зеркал и чечевиц для зрительных инструментов. Фирма И.Я. Урлауба экспонировалась в двух отделах – научном отделе, где выставила оптические и окулистические приборы и принадлежности, и военном отделе, где фирмой были выставлены бинокли. Из глазных инструментов на выставке наибольшее внимание привлекли своей портативностью, практичностью и в то же время дешевизной наборы профессора Г.А. Донберга, из биноклей – военно-полевые бинокли образца Главного штаба, артиллерийские бинокли образца Кронштадтской крепостной артиллерии, военно-полевые бинокли новейшего образца (1896 г.) «со складными переносками, для установки центров стекол против зрачков наблюдателя», военно-морские бинокли, офицерские бинокли из алюминия.

Новинкой фирмы на Всероссийской выставке 1896 г. стали бинокли под названием «Силосвет». Преимуществом этих биноклей, кроме дешевизны, были широкое поле зрения, сильное увеличение и незначительное поглощение света. Эти бинокли годились как для дневных, так и для ночных наблюдений на море, на поле, при стрельбе и воздухоплавании. По итогам Всероссийской промышленно-художественной выставки фирме И.Я. Урлауба была присуждена золотая медаль «за безукоризненную шлифовку оптических чечевиц и производство биноклей» [4, С.13].

В 1897 г. в Москве на выставке, состоявшейся при 12-м Международном медицинском конгрессе, фирма была награждена Почетным дипломом за лучшее изготовление очков, пенсне, луп, призм и оптометрических приборов для врачей-окулистов.

В 1899 г. И.Я. Урлауб издал в Петербурге книгу, которая получила название «Очерк истории оптики и истории оптического производства в России», вызвавшую большой интерес в научных кругах России (рецензия на нее была опубликована в «Правительственном Вестнике» от 28 ноября 1899 г.). В своей работе автор подчеркивал различия, которые существовали в производстве оптических приборов за границей и в нашей стране. По его мнению, в Западной Европе выпуск оптических товаров налаживался постепенно и, наконец, стал представлять собой четкую систему, причем раньше, чем медицина достигла определенного уровня; офтальмология могла использовать возможности более-менее совершенного оптического производства. В России офтальмология «выделилась» из хирургии, когда промышленного оптического производства еще не существовало. В своей книге автор приводит спорное утверждение, что «именно русская офтальмология вызвала в России оптическое производство, содействовала вообще развитию оптического производства» [5, С. 5]. И.Я. Урлауб выделяет особенности развития оптики в России, справедливо полагая, что теория оптики развивалась здесь вместе с техникой оптического производства. Целью своей работы автор ставил привлечение внимания к проблеме необходимости подготовки оптиков средними и высшими техническими учебными заведениями России для утверждения независимости страны от иностранных производств.

Представляется интересным, что на фабрике Урлауба работали только русские рабочие (в основном, выходцы из Тверской губернии). На фабрике была организована подготовка мастеров и подмастерьев оптического дела. С 1879 г. в мастерскую принимались мальчики от 13 до 15 лет на попечение И.Я. Урлауба. С 1897 г. контингент пополнялся за счет Ремесленного отдела общества попечения о бедных и больных детях. Ежегодно обучалось 10–12 человек. С начала приема учеников и до 1902 г. было подготовлено 44 мальчика, из них вышли опытные мастера по шлифовке оптических стекол, по изготовлению очков, пенсне, лорнетов и других оптико-механических приборов. Большинство учеников осталось после обучения работать на фабрике Урлауба. Во время проведения в Санкт-Петербурге Ремесленной выставки 1899 г. было устроено публичное испытание учеников оптико-механической мастерской Урлауба и оценка их работ экспертной комиссией. По результатам испытания ученические работы фирмы были награждены Бронзовой медалью Министерства финансов [6, С.18].

В 1900 г. в Париже проводилась Всемирная промышленная выставка. Россию представляли 2500 участников. Фирма И.Я. Урлауба приняла участие в выставке в Отделе гигиены и по итогам выставки была награждена Серебряной медалью «за производство новейших защищающих очков русских типов» [7, С. 23].

В 1901 г. император Николай II, по представлению Военного Министра, за заслуги по созданию оптических приборов, пожаловал И.Я. Урлаубу Золотую медаль.

В 1904 г. в Петербурге на Объединенной выставке съезда хирургов и 9-го съезда Общества русских врачей фирма была награждена Высшей наградой «за глазные хирургические инструменты, установленные русскими офтальмологами, и за безупречное изготовление светолечебных аппаратов и всех к ним принадлежностей» [7, С.25].

После Октябрьской революции 1917 г. фирма И.Я. Урлауба была национализирована, но он сам остался работать в ней как специалист. Фирма прекратила свое существование в начале 30-х гг. XX в. В 1932 г. И.Я. Урлауб уехал в Германию, где в 1936 г. скончался.

Заключение

Фирма И.Я. Урлауба внесла большой вклад в развитие оптического дела в России, так как в стране в конце XIX – начале XX в.в. не изготавливались оптические инструменты, не было мастеров оптики, общество предпочитало заграничные изделия. С помощью фирмы происходило сближение оптического производства с медицинской и физической наукой.

Статья подготовлена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г.г. в соответствии с государственным контрактом по проблеме «Зарождение и становление в России оптической науки и промышленности (к. XIX – нач. XX вв.): государственная политика, социальные результаты, историческая репрезентация».

Литература

1. Рождественский Д. С. Судьбы оптики в СССР. XV лет Государственного оптического института // Сб. статей под ред. С.И. Вавилова. – М., 1934. – 589 с.
2. Севастьянов С. Богач, прошедший сквозь игольные уши // Вера и жизнь. – 1999. – №5.
3. Обзор 25-летней деятельности фирмы оптик-механик И.Я. Урлауб. – СПб, 1902. – 25 с.
4. Альбом участников Всероссийской промышленно-художественной выставки в Нижнем Новгороде в 1896 году. Часть 2. – СПб, 1896. – 53 с.
5. Очерк истории оптики и истории оптического производства в России. – СПб, 1899. – 32 с.
6. Краткое описание деятельности фирмы "Ив. Як. Урлауб" // Указатель окулистов. – СПб, 1905. – 34 с.
7. Завадский Н.Б. Заметка о назревающей у нас новой форме промышленности. – СПб, 1908. – 28 с.

Каменская Надежда Евгеньевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат исторических наук, доцент, nkamenskaya@mail.ru

УДК 93/94:377

К ВОПРОСУ О ПОДГОТОВКЕ КВАЛИФИЦИРОВАННЫХ КАДРОВ ДЛЯ РУССКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА РУБЕЖЕ XIX-XX В.В. (СЪЕЗДЫ РУССКИХ ДЕЯТЕЛЕЙ ПО ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ И ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБРАЗОВАНИЮ)

О.В. Кузьмина

Рассматриваются проблемы, связанные с подготовкой кадров квалифицированных мастеров и рабочих для российской промышленности в конце XIX – начале XX вв. в условиях развития пореформенной экономики. Эти проблемы находились в центре внимания Императорского русского технического общества, по инициативе которого было проведено три съезда. Статья рассчитана на всех, кто интересуется историей отечественного профессионального образования.

Ключевые слова: профессиональное образование, техническое образование, промышленное развитие.

Особенности профессионального образования

Реформы 60–70-х гг. XIX в. («Великие реформы») дали существенный толчок развитию капитализма в России и ускорили завершение в стране промышленного переворота (как в технологическом, так и в социальном планах). Как и в других странах, индустриализация в пореформенной России была невозможна без квалифицированных мастеров и рабочих.

Существовавшие к тому времени в России учебные заведения не могли удовлетворить растущий спрос, а кроме того отсутствовала общая система подготовки специалистов для различных отраслей про-

мышленности, в том числе и принципиально новых. Высшие учебные заведения носили узкоспециальную направленность (Горный, Технологический, институт инженеров путей сообщения), и возможность подготовки в них по новым специальностям не рассматривалась. Создание же политехнических учебных заведений (институтов или политехникумов) началось только с 1898 г. В этой ситуации существующие и возникающие низшие и средние профессиональные учебные заведения могли стать базой для подготовки специалистов в новых отраслях.

В 1863–1864 гг. был утвержден комплекс Уставов, который регламентировал всю систему образования в России – от начальной до высшей школы. Только в 1878 г. в соответствии с мнением Государственного совета Министерству финансов высочайше было поручено разработать общий план промышленного образования. Еще через 10 лет (в 1888 г.) было утверждено Положение о промышленном образовании. В разработке этого документа принимал активное участие И.А. Вышнеградский, известный математик, член Учебного комитета Министерства народного просвещения, министр финансов в 1888–1892 гг.

В соответствии с классификацией, предложенной вышеупомянутым Положением, промышленные учебные заведения делились на ремесленные (в них осуществлялось практическое обучение приемам какого-либо производства), низшие технические («сообщающие знания и умения непосредственным руководителям труда рабочих») и средние технические («сообщающие знания техникам как ближайшим помощникам инженеров и других высших руководителей промышленного дела») [1, С. 170]. Таким образом, предполагалось, что низшие училища будут готовить квалифицированных рабочих, а средние – техников, руководителей среднего звена, посредников между инженерами и основной массой рабочих (можно вспомнить систему профессионально-технических училищ и техникумов в СССР). Но практика показала, что в действительности учебные программы не всегда соответствовали статусу учебного заведения.

В качестве источников содержания промышленных училищ всех категорий в Положении упоминалась казна, а также средства земств, сословий, частных лиц. Контроль над деятельностью учебных заведений со стороны Министерства народного просвещения предполагался только в том случае, если они содержались на казенные средства. В результате, несмотря на появление единого нормативного документа, обеспечение даже уже существовавших училищ учащимися с необходимым исходным уровнем знаний, а также выпуск из таких заведений действительно квалифицированных специалистов для работы в определенной отрасли становились весьма проблематичными.

Инициатива проведения съездов, посвященных рассмотрению состояния профессионального и технического образования в стране и выработке соответствующих рекомендаций, была проявлена постоянной комиссией по профессиональному и техническому образованию Императорского русского технического общества (ИРТО, основанного в 1866 году) после состоявшегося в 1886 г. в Бордо международного конгресса по вопросу о техническом, ремесленном и коммерческом образовании. В планах было проведение следующего международного конгресса в 1888 г. в Петербурге, но препятствиями стали отсутствие системы в организации соответствующих учебных заведений в России и крайне скудные сведения о них (это именовалось «недостаточной подготовленностью России» к участию в конгрессе) [2, С. 5]. Ввиду этого решено было провести всероссийский съезд.

Проблемы, обсуждавшиеся на съездах

Состоялось три съезда, посвященных рассматриваемой проблеме: в 1889–1890 гг., 1895–1896 гг., 1903–1904 гг. (съезды проходили во время рождественских каникул). Необходимо отметить, что речь на них шла в большей степени о низшем и среднем профессиональном образовании. В съездах принимали участие представители науки, учебных заведений из разных городов России, земские деятели. Средства, на которые проводились съезды, были сформированы в основном из частных пожертвований.

Перед началом 1-го съезда Комитет по ремесленным и техническим учебным заведениям ИРТО разослал по известным ему учебным заведениям вопросник. На основании полученных ответов И.А. Анопов (директор ремесленного училища Цесаревича Николая и председатель комитета по организации выставки работ учащихся, открывшейся одновременно с открытием 1-го съезда) подготовил сборник материалов по современному состоянию среднего и низшего технического и ремесленного образования в России (это был первый опыт систематизации в рассматриваемой области).

В числе целей как 1-го, так и 2-го съездов значились следующие: обсуждение организационных вопросов и учебных планов для промышленных училищ (они фигурировали под различными наименованиями: низшие, средние технические училища, ремесленные училища); выработка основополагающих принципов промышленного образования в России. Терминологические споры, особенно присутствовавшие на 1-ом съезде, свидетельствовали о том, что не было четкого определения каждого типа профессиональной школы.

1-ый съезд русских деятелей по профессиональному и техническому образованию носил для его участников ознакомительный характер. Несмотря на то, что значительная часть учебных заведений в

1881 г. перешла из ведения Министерства финансов в ведение Министерства народного просвещения, последнее не располагало всеобъемлющей и систематической картиной.

На первых двух съездах отмечались такие черты российского профессионального образования как отсутствие до последнего времени (80–90-е гг. XIX в.) активного участия правительства в деле его организации; слабая вовлеченность в это дело общественности в силу отсутствия в стране привычки обсуждать социальные вопросы; непроизводительная трата сил и средств вследствие отсутствия целостной системы профессионального образования.

Но, рассматривая эти проблемы, невозможно было обойти главную – отсутствие в стране обязательного начального образования. Зачастую профессиональные училища принимали на себя роль именно начальных школ, в которых слушатели учились грамоте, счету и только после этого с большим или меньшим успехом переходили к специальным предметам.

Среди вопросов, затрагивавшихся на первых двух съездах, были следующие: низкий уровень подготовки наставников в профессиональных училищах; отсутствие учебных пособий и эффективных методик обучения; нежелание выпускников работать по полученной специальности, поиски ими более высокооплачиваемой работы и возможности «избежать часто крайне необразованной и безнравственной среды рабочих» [3, С. 39]; присвоение выпускникам учебных заведений особых прав, что было очень важно в сословном государстве.

Довольно большое внимание было уделено методическим вопросам: о стандартах подготовки будущих специалистов, о наиболее эффективных способах проведения практических занятий, об эффективности различных способов проверки знаний учащихся, о необходимости качественных учебно-методических пособий и др. Как очень важное дело рассматривалось прослеживание судьбы выпускников, что представлялось возможным только при участии промышленных предприятий, на которые они приходили работать после окончания учебы.

Показательно, что на секциях съездов, рассматривавших проблемы низшего и среднего технического образования, выступающие постоянно возвращались к вопросу об объеме и роли общего образования в этих учебных заведениях. Наиболее отчетливо существовавшие опасения выразил в своем выступлении А.Г. Неболсин, возглавлявший комиссию по профессиональному образованию в ИРТО: «... Считаю очень опасным все более и более распространяющееся у нас в обществе мнение об избытке в России людей, получивших не только высшее и среднее, а даже и низшее образование, о бесполезности этого образования и о необходимости придать ему какое-нибудь практическое направление...» [4, С. 7]. Не только Неболсин, но и другие выступающие отмечали, что одной из причин низких успехов отечественных профессиональных училищ (как в количественном, так и в качественном отношении) является, в частности, «индифферентность промышленников к судьбам школы, стремление этих промышленников к скорейшему обогащению, нередко в ущерб самой промышленности, иногда невежество и косность их» [4, С. 39].

При обсуждении специализации профессиональных училищ подчеркивалось, что основные профессии, получаемые учащимися, – слесарь и столяр; кроме того, отдельные заведения готовили литейщиков, токарей, кузнецов, сапожников и т.п. Для развития же новых отраслей отечественной промышленности требовалось открытие химико-технических, электротехнических училищ, а также школ для мукомолов, ткачей и прядильщиков (что было продиктовано особенностями экономического развития пореформенной России, в которой в первую очередь развивались пищевая и текстильная промышленность).

На 2-ом съезде была предпринята еще одна попытка классификации профессиональных училищ, необходимых для подготовки специалистов. Эти училища были поделены на следующие категории: механико-технические (готовившие машинистов, сельскохозяйственных механиков, ткацких и прядильных мастеров, монтеров-электротехников, механико-оптиков, часовщиков и т.п.); химико-технические; технические (готовившие специалистов для железных дорог, судостроения и судовождения); ремесленные (в этой категории училищ упор делался на художественную подготовку выпускников, которые могли бы открыть собственные мастерские – см. выше, а также модельщиков и литейщиков).

Предполагалось, что более узкая специализация позволит обеспечить и более эффективное обучение именно конкретной профессии, «не страдать многоремесленностью». Выдвигались предложения обратить особое внимание на необходимость учреждения в России училищ для подготовки специалистов в области фотографии и «физико-механиков». Под последними понимались специалисты по изготовлению физических и математических инструментов и бытовой оптики. Но, заметим, речь шла не о тех училищах, которые уже существовали, а о тех, которые были необходимы для развития новых отраслей.

3-й съезд оказался наиболее представительным (более 3 тыс. участников). Главным вопросом на нем был вопрос об общем образовании рабочих и их детей. В рамках секции съезда, посвященной школам и курсам для рабочих, делегаты подчеркивали, что общее образование является основой для развития промышленности, и его распространение должно рассматриваться государством как одна из протекционистских мер. Обращалось внимание на то, что российская промышленность не может быть конку-

рентоспособной при существующем состоянии общего образования [5, С. 3]. На фоне разворачивавшихся в стране событий делегаты съезда перешли к обсуждению рабочего вопроса в целом, что предопределило судьбу съезда: его работа была прекращена досрочно. Во время проведения 3-го съезда существенно изменилась обстановка в стране: на повестке дня стоял не только вопрос о подготовке квалифицированных кадров, но и об условиях труда и жизни рабочих. Причем вопрос этот был инициирован «снизу».

Заключение

На съездах русских деятелей по профессиональному и техническому образованию были выдвинуты проблемы, касающиеся не только развития конкретных отраслей экономики, невозможного при отсутствии кадров соответствующей квалификации, но и многие социальные вопросы, нерешенность которых имела далеко идущие последствия. Предложение делегатов 3-го съезда о разработке Положения о постоянных съездах по техническому и профессиональному образованию при ИРТО не получило своего развития; 3-й съезд оказался и последним. Революционные события в стране на несколько лет отодвинули рассматриваемую проблему. Закон же о всеобщем начальном образовании был принят только в 1908 г. Правительство при этом не спешило выделять средства на его реализацию.

При наблюдавшемся в начале XX в. увеличении количества средних и низших технических училищ к 1910 г. в них обучалось не более 80 тыс. человек (при населении Российской империи в 125 млн. человек). Необходимо помнить о том, что к 1917 г. более 70% населения России оставалось неграмотным, в основном крестьянским, что, по определению, лишало профессиональные школы в России широкой социальной базы, а, соответственно, и возможности подготовки необходимого количества квалифицированных специалистов для всех новых и, особенно, высокотехнологичных для того времени отраслей производства.

Съезды русских деятелей по профессиональному и техническому образованию можно расценивать как проявление в легальных рамках общественной инициативы по сбору информации, выявлению болевых точек, обмену опытом в области подготовки специалистов разного уровня для различных отраслей экономики и т.п. Безусловно, была проведена большая работа по систематизации соответствующих учебных заведений и постановке задач перед каждым их типом. Но нельзя сказать, что в результате работы этих форумов была создана цельная и отвечающая потребностям экономического развития страны система профессионального образования. Недостаточное количество квалифицированных мастеров и рабочих сыграло свою негативную роль как в экономическом, так и в социальном плане, особенно в годы Первой мировой войны.

Статья подготовлена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. в соответствии с государственным контрактом по проблеме «Зарождение и становление в России оптической науки и промышленности (к. XIX – нач. XX вв.): государственная политика, социальные результаты, историческая репрезентация»

Литература

1. Свод законов Российской империи. Кн. 4. Т. XI, ч. 1. – СПб, 1912. – 1321 с.
2. Труды организационного комитета съезда русских деятелей по техническому и профессиональному образованию в России. – СПб, 1890. – 194 с.
3. Съезд русских деятелей по техническому и профессиональному образованию в России. Общая часть / Под ред. В.И. Срезневского. – СПб, 1891. – 69 с.
4. Неболсин А.Г. Об устройстве периодических выставок и съездов по техническому и профессиональному образованию // Съезд русских деятелей по техническому и профессиональному образованию в России. Общая часть / Под ред. В.И. Срезневского. – СПб, 1891. – 69 с.
5. Санкт-Петербургские ведомости. – 1903. – № 354.
6. Биржевые ведомости. – 2-е издание. – 1904. – 4 января.

Кузьмина Ольга Викторовна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат исторических наук, доцент, зав. кафедрой, kuzmina.o@mail.ru

УДК 535.8:535.62:621.383.8

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОУРОВНЕВЫХ СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВИДИМОГО И КОРОТКОВОЛНОВОГО ИК ДИАПАЗОНОВ

Е.А. Яроцкая

Излагаются основные результаты исследования спектрозональных оптико-электронных систем видимого и коротковолнового ИК диапазонов.

Ключевые слова: электронно-оптический преобразователь (ЭОП), гибридно-модульный преобразователь (ГМП), низкоуровневая спектрозональная оптико-электронная система (СЗОЭС).

Для развития теории создания низкоуровневых СЗОЭС на основе традиционных ЭОП (поколения II⁺ и III) и ГМП необходимо разработать конкретные методики расчета и выбора их основных компонентов. В связи с этим были выполнены следующие исследования.

Проведен выбор числа спектральных каналов и координат расположения максимумов их спектральной чувствительности внутри широкого спектрального диапазона (0,38–1,7 мкм). В результате проведенных исследований было показано, что наилучшим с точки зрения селекции полезного сигнала, отраженного от цели (например, от танка), на фоне помехи (например, излучения, отраженного от естественного земного ландшафта) при минимизации массогабаритных характеристик СЗОЭС оказался выбор двух–трех рабочих каналов. Для видимого диапазона (0,38–0,76 мкм) максимумы спектральных характеристик должны находиться на длинах волн 0,44; 0,55; 0,61 мкм, а для диапазона 0,9–1,7 мкм – на длинах волн 1,2 и 1,6 мкм.

Анализ методов выделения рабочих спектральных каналов показал, что коэффициент пропускания канала светодетельного блока СЗОЭС должен быть не менее 0,11–0,15.

При разработке схем построения СЗОЭС, работающих в видимом спектральном диапазоне, в качестве оценки их чувствительности целесообразно принимать такую освещенность на местности, при которой еще сохраняются цвета в изображении, формируемом на экране монитора. Была разработана методика вычисления чувствительности СЗОЭС на основе ГМП [1]. При использовании объектива с относительным отверстием 1:1,5 расчетное значение чувствительности оказалось равным 0,0045 лк.

При определении разрешающей способности СЗОЭС в центре кадра освещенность на местности принималась равной 10⁻² лк. При этих условиях, как показывают расчеты, значение разрешающей способности оказалось равным 350 телевизионным линиям.

Был предложен новый способ получения цветного изображения посредством ЭОП с электронно-возбуждаемой ПЗС-матрицей [2].

Предполагается, что дальнейшее развитие СЗОЭС будет идти по пути использования в качестве приемников излучения высокочувствительных ТВ камер на ПЗС-матрицах с внутренним электронным умножением и коротковолновых ИК-камер на базе структур InGaAs.

1. Колосов М.П., Костикова Н.Ю., Здобникова (Яроцкая) Е.А. Оценка чувствительности цветной низкоуровневой телевизионной камеры // Сборник трудов VI международной конференции «Прикладная оптика». СПб, 18–21 октября 2004 г. – Оптическое приборостроение – Том 1(2). – С. 319–323.
2. Яроцкая Е.А. и др. Электронно-оптический преобразователь и способ получения видеоизображения». – Пат. 2308116 РФ, МПК H01J 31/56, опубл. 10.10. 2007 г., Б. №28.

Яроцкая Екатерина Александровна - Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), аспирант, katrin-ya@yandex.ru

УДК 621.384.3

РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ СМЕЩЕНИЙ И УГЛА ПОВОРОТА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО НАБЛЮДАЕМОЙ СЦЕНЫ

А.Ю. Поляков, В.В. Тресков, В.М. Демидов

Предлагаемый метод расчета позволяет точно вычислять линейные смещения и угол поворота между последовательными кадрами, получаемыми при помощи оптико-электронной системы, движущейся относительно наблюдаемой ею неподвижной сцены.

Ключевые слова: итерационный анализ изображения, модель межкадрового преобразования.

При движении оптико-электронной системы относительно наблюдаемой ею неподвижной сцены в плоскости, перпендикулярной ее оптической оси, и вращении вокруг этой оси преимущественно происходят линейные смещения Δx , Δy и поворот φ изображений $f_1(x,y)$ и $f_2(x,y)$, являющихся последовательно получаемыми кадрами, в ортогональной системе координат (x,y) :

$$\begin{aligned} f_2(x,y) &\approx f_1(x',y'), \\ x' &= \cos \varphi \cdot x + \sin \varphi \cdot y + \Delta x, \\ y' &= -\sin \varphi \cdot x + \cos \varphi \cdot y + \Delta y. \end{aligned}$$

Разность двух последовательно получаемых кадров в случае высокой скорости накопления сигнала на приемнике можно представить как

$$\Delta f(x,y) = f_2(x,y) - f_1(x,y) = f_1(x',y') - f_1(x,y) \approx \frac{\partial f_1}{\partial x}(x,y)dx + \frac{\partial f_1}{\partial y}(x,y)dy.$$

Если угол поворота составляет по модулю менее 5° , тогда $dx = x' - x \approx \varphi \cdot y + \Delta x$, $dy = y' - y \approx -\varphi \cdot x + \Delta y$. Минимизируя сумму квадратов невязок $F(\Delta x, \Delta y, \varphi) = \sum_{x,y} (f_x dx + f_y dy - \Delta f)^2$, по-

лучим систему линейных уравнений

$$\begin{aligned} \varphi \cdot \left[\sum_{x,y} f_x \cdot (f_x \cdot y - f_y \cdot x) \right] + \Delta x \cdot \left[\sum_{x,y} f_x^2 \right] + \Delta y \cdot \left[\sum_{x,y} f_x \cdot f_y \right] &= \sum_{x,y} [\Delta f \cdot f_x], \\ \varphi \cdot \left[\sum_{x,y} f_y \cdot (f_x \cdot y - f_y \cdot x) \right] + \Delta x \cdot \left[\sum_{x,y} f_x \cdot f_y \right] + \Delta y \cdot \left[\sum_{x,y} f_y^2 \right] &= \sum_{x,y} [\Delta f \cdot f_y], \\ \varphi \cdot \left[\sum_{x,y} (f_x \cdot y - f_y \cdot x)^2 \right] + \Delta x \cdot \left[\sum_{x,y} f_x \cdot (f_x \cdot y - f_y \cdot x) \right] + \Delta y \cdot \left[\sum_{x,y} f_y \cdot (f_x \cdot y - f_y \cdot x) \right] &= \\ = \sum_{x,y} [\Delta f \cdot (f_x \cdot y - f_y \cdot x)], \end{aligned}$$

решение которой дает искомые параметры $(\varphi, \Delta x, \Delta y)$.

Для практической реализации метода можно многократно последовательно применить к обоим изображениям пространственный фильтр формата 3×3 пикселя, реализующий взвешенное среднее, а затем производить вычисление и уточнение параметров $(\varphi, \Delta x, \Delta y)$ по указанным выше соотношениям.

Поляков Александр Юрьевич – ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Циклон», аспирант Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), arolyakov1985@rambler.ru; *Тресков Виктор Викторович* – ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Циклон», dep140@yandex.ru; *Демидов Владимир Михайлович* – ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Циклон», кандидат технических наук, demidovova@yandex.ru.

УДК 536.8:621.384

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ
ПО ПОЛОЖЕНИЮ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

С.В. Михеев, К.Г. Араканцев, Т.В. Копылова

Проведены исследования схем построения оптико-электронной системы контроля промышленных сооружений, которая представляет собой множество телевизионных каналов с перекрывающимися угловыми полями и активными маркерами контрольных точек.

Ключевые слова: оптико-электронная система для контроля сооружений.

Развитие современной элементной базы позволяет создавать оптико-электронные системы длительного контроля состояния сооружений по пространственному положению их элементов [1].

Измерительные каналы таких систем можно построить по двум схемам. Первая – это схема, реализующая метод прямой угловой засечки. Вторая – схема, реализующая метод обратной угловой засечки [2, 3]. Предлагается система, позволяющая совместить достоинства двух схем и частично компенсировать недостатки каждой из них. Она будет представлять собой совокупность измерительных каналов, состоящих из матричных фотоприемников, оптических систем и маркеров – источников инфракрасного излучения (так как максимум излучения источника близок к максимуму спектральной характеристики приемника). Измерительные каналы имеют перекрывающиеся угловые поля, что обеспечивает одновременный контроль множества маркеров. Такая схема позволяет расширить диапазоны измерений и повысить надежность контроля. С помощью подобных систем можно вычислить центр нагрузок на конструкцию и определить ориентировочно деформации сооружения. Охватив элементами измерительной системы необходимое количество элементов конструкции и связав их в единую вычислительную сеть, можно получать в реальном времени информацию о состоянии и динамике сооружения.

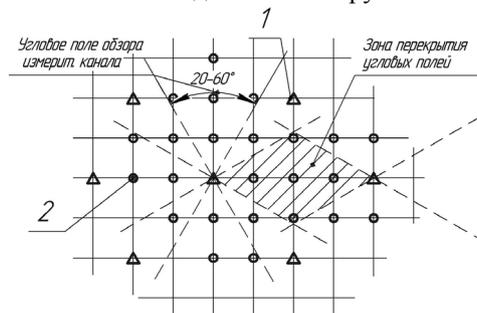


Рисунок. Структура распределенных оптико-электронных систем: 1 – измерительные каналы, 2 – маркеры контрольных точек

Математическое моделирование и проведение испытаний на макете показали, что для измерительных каналов, построенных по первой схеме, средняя квадратическая погрешность измерения поперечных смещений близка к 0,04 мм, а средняя квадратическая погрешность определения расстояния – 0,08 мм. Для второй схемы средняя квадратическая погрешность определения поперечных смещений близка к 0,08 мм, а определения расстояния – 1,5 мм. Погрешность измерения угловых координат для обеих схем составила 0,03° на дистанциях до 30 м. Значительное влияние на погрешность измерения оказывает шум, присущий матричному фотоприемнику, а также погрешность определения заднего фокусного расстояния.

Можно сделать вывод о том, что оптимальная структура измерительного канала должна совмещать две схемы построения измерительного канала и иметь несколько каналов на одной базовой поверхности. На рисунке представлена схема расположения маркеров и измерительных каналов системы.

Проект выполняется в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.1 Проведение научных исследований молодыми учеными – кандидатами наук.

1. Резник Б.Е. Непрерывные геодезические измерения деформаций строительных конструкций эксплуатируемых сооружений // Геопрофи. – 2009. – №2. – С. 4–10.
2. Кондрашков А. В. Электрооптические и радиогеодезические измерения. – М.: Недра, 1972. – 344 с.
3. Коротаяев В.В., Тимофеев А.Н., Иванов А.Г. Проблемы разработки оптико-электронных систем для контроля деформаций крупногабаритных объектов // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67. – № 4. – С. 43–46.

Михеев Сергей Васильевич – СПбГУ ИТМО, кандидат технических наук, доцент, msv@grv.ifmo.ru; Араканцев Константин Геннадьевич – СПбГУ ИТМО, аспирант, kostya3312@mail.ru; Копылова Татьяна Валерьевна – СПбГУ ИТМО, студент, oeps@grv.ifmo.ru

УДК 535.15

ПОЛУЧЕНИЕ МУЛЬТИПЛЕКСНЫХ ГОЛОГРАММ НА ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ

А.С. Златов, Ю.Л. Корзинин, Н.В. Никоноров

Рассмотрена возможность получения мультиплексных наложенных фазовых объемных голограмм на фото-термо-рефрактивном стекле.

Ключевые слова: голография, мультиплексные элементы, фото-термо-рефрактивное стекло.

Объемные фазовые голограммы на основе фото-термо-рефрактивных (ФТР) стекол [1] находят все более широкое применение в лазерной технике. Так, например, на их основе возможно создание брэгговских сверхузкополосных спектральных селекторов, фильтров и внутрирезонаторных зеркал для мощных твердотельных и полупроводниковых лазеров [2]. Голограммы на ФТР-стеклах обладают высокой дифракционной эффективностью и спектрально-угловой селективностью, у них отсутствует стирание изображения в процессе считывания, нет ограничений на время их жизни. ФТР-стекла обладают высокой химической устойчивостью и механической прочностью, они выдерживают воздействие мощного непрерывного и импульсного лазерного излучения. Однако наличие полосы поглощения коллоидного серебра, а также рассеяние на микрокристаллической фазе ограничивают применения этого материала в видимом диапазоне спектра. Таким образом, ФТР-стекла наиболее привлекательны для создания голограммных оптических элементов, работающих в ИК диапазоне спектра.

В работе исследовались параметры наложенных голограмм в ФТР-стекле при их различных суммарных экспозиционных дозах облучения. Кроме самой возможности записи наложенных объемных голограмм на ФТР стекле, в работе был рассмотрен характер зависимости дифракционной эффективности и амплитуды модуляции показателя преломления при различных суммарных дозах облучения от номера наложенной голограммы и произведено сравнение характеристик наложенных элементов с элементами, полученными в результате однократного экспонирования.

Для получения голограмм использовались образцы толщиной около 1,5 мм, запись производилась по симметричной двухлучевой схеме He-Cd лазером, работающим на длине волны 325 нм. Голограммы записывались на ФТР-стекле, состав которого специально оптимизирован для создания высокоселективных объемных брэгговских элементов для ИК-области спектра с низким уровнем рассеяния. Было записано три одиночных элемента и два наложенных с пятью одинаковыми голограммами в каждом. Экспозиции одиночных голограмм: 0,36, 0,8 и 2 Дж/см². Экспозиции голограмм в наложенных элементах: 0,36 и 0,8 Дж/см². Дозы подбирались под используемое в эксперименте ФТР-стекло таким образом, чтобы первый наложенный элемент суммарно «вырабатывал» весь динамический диапазон изменения показателя преломления стекла, а для второго образца динамического диапазона изменения показателя преломления на все записываемые голограммы уже не хватало. Дифракционная эффективность голограмм измерялась экспериментально, амплитуда модуляции показателя преломления рассчитывалась из экспериментально измеряемого контура угловой селективности голограммы [3].

В результате было получено, что у первого наложенного элемента характеристики пяти голограмм (дифракционные эффективности и амплитуды модуляции показателя преломления) совпадают с характеристиками однократно экспонированного элемента с дозой записи 0,36 Дж/см². Во втором наложенном элементе, который «вышел» за динамический диапазон, получилось, что у последних двух голограмм дифракционная эффективность и амплитуда модуляции показателя преломления несколько ниже, чем у первых трех голограмм, характеристики которых совпадают с элементом, однократно экспонированным дозой 0,36 Дж/см². Относительная разница между первыми тремя и последними двумя голограммами во втором элементе составляет менее 2%.

Таким образом, было установлено, что при записи на ФТР-стекле наложенных элементов, состоящих из одинаковых брэгговских решеток, динамический диапазон стремится равномерно распределиться между всеми голограммами независимо от суммарной экспозиционной дозы облучения образца.

1. Кучинский С.А., Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Савин В.В., Туниманова И.В. Свойства объемных фазовых голограмм на мультихромных стеклах // Оптика и спектроскопия. – 1991. – Т. 70. – № 6. – С. 1296.
2. Venus G., Sevia A., Glebov L. Stable coherent coupling of laser diodes by a volume Bragg grating in PTR glass // High-Power Diode Laser Technology and Applications IV / Ed.: M. Zediker // Proceedings of SPIE. – 2006. – 6104. – 61040S.
3. Златов А.С., Корзинин Ю.Л., Никоноров Н.В. Изменение показателя преломления фото-термо-рефрактивных стекол в ближней инфракрасной области спектра // Сборник трудов международной конференции «Оптика-2007». – С. 384.

Златов Андрей Сергеевич – СПбГУ ИТМО, студент, zlatov@oi.ifmo.ru; *Корзинин Юрий Леонидович* – СПбГУ ИТМО, кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, korzinin@oi.ifmo.ru; *Никоноров Николай Валентинович* – СПбГУ ИТМО, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, nikonovov@oi.ifmo.ru

УДК 535.15

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
ОБЪЕМНЫХ ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММ, ЗАПИСАННЫХ НА ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ
СТЕКЛЕ****А.С. Златов, С.А. Иванов, М.Ю. Приказов, Ю.Л. Корзинин, Н.В. Никоноров**

Исследована зависимость амплитуды модуляции первой гармоники показателя преломления объемных голограмм на силикатном фото-термо-рефрактивном стекле от параметров термообработки.

Ключевые слова: голография, термическая обработка, фото-термо-рефрактивное стекло.

Одним из перспективных материалов для создания эффективных голограммных объемных элементов являются фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла [1]. Голограммы на этих стеклах обладают высокой дифракционной эффективностью и спектрально-угловой селективностью. Высокая термическая и оптическая прочность фото-термо-рефрактивных стекол позволяет использовать такие голограммные оптические элементы в мощных лазерных системах. Кроме этого, голограммы, зарегистрированные в ФТР-стекле, обладают высокой химической устойчивостью и механической прочностью и в этом отношении практически не отличаются от коммерческого оптического стекла К8.

В работе использованы цинковоалюмосиликатные ФТР стекла с большим содержанием фтора, активированные ионами церия, серебра и сурьмы. Стекла были синтезированы в кварцевых тиглях при температуре 1500°C из реактивов марки ОСЧ. Исследованы свойства объемных фазовых голограмм на силикатном ФТР стекле, запись голограмм производилась He-Cd лазером на длине волны 325 нм по симметричной двулучевой схеме. Измерения угловой селективности проводились на двух длинах волн – в видимой области He-Ne лазером ($\lambda=633$ нм) и полупроводниковым лазером ($\lambda=850$ нм). Также в работе измерялась дифракционная эффективность исследуемых голограмм. Амплитуда модуляции первой гармоники показателя преломления рассчитывалась путем сравнения экспериментально измеренного и расчетного контура угловой селективности.

В результате проведенных экспериментов было установлено влияние параметров завершающего этапа термической обработки образца на величину амплитуды модуляции первой гармоники показателя преломления, причем были получены значительно большие значения по сравнению с литературными данными [2]. Изменение амплитуды модуляции первой гармоники показателя преломления для наших стекол составило $2,5 \cdot 10^{-5}$, хотя, по данным приведенной выше статьи, эти изменения должны были составить величину порядка $1 \cdot 10^{-6}$. Также было получено, что в ИК области спектра с ростом времени охлаждения значение амплитуды модуляции первой гармоники показателя преломления падает, в красной области спектра оно сначала уменьшается, но в дальнейшем несколько возрастает. Исследование спектров поглощения также показало, что медленное охлаждение ФТР-стекла приводит к росту полосы поглощения коллоидного серебра с максимумом 455 нм и его сдвигу в коротковолновую область спектра.

Причина таких изменений может быть связана с возникновением и релаксацией напряжений между стеклофазой и кристаллической фазой. Так, при быстром охлаждении могут возникать механические напряжения, которые, в свою очередь, могут приводить к увеличению показателя преломления за счет эффекта фотоупругости. При медленном охлаждении механические напряжения релаксируют, и их вклад в общее изменение показателя преломления при фото-термо-индуцированной кристаллизации стекла незначителен. Аналогичные выводы были сделаны в работе [2]. Сдвиг полосы поглощения в коротковолновую сторону у образца, полученного медленным охлаждением, может быть связан с изменением формы, структуры и дефектных состояний нанокристаллов (NaF-AgBr) по сравнению с образцом, полученным при быстром охлаждении (закалкой) [3].

Результаты работы показывают, что для получения лучших характеристик объемных трехмерных голограмм на ФТР-стекле образцы этого стекла необходимо охлаждать с большей скоростью.

1. Кучинский С.А., Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Савин В.В., Туниманова И.В. Свойства объемных фазовых голограмм на мультихромных стеклах // Оптика и спектроскопия. – 1991. – Т. 70. – № 6. – С. 1296.
2. Lumeau J., Glebova L., Souza G.P., Zanotto E.D., Glebov L.B. Effect of cooling on the optical properties and crystallization of UV-exposed photo-thermo-refractive glass // Journal of Non-Crystalline Solids. – V. 354. – Is. 42–44. – P. 4730–4736.
3. Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomskii V.A., and Lazareva K.E. Effect of a Dielectric Shell of a Silver Nanoparticle on the Spectral Position of the Plasmon Resonance of the Nanoparticle in Photochromic Glass // Optics and Spectroscopy. – 2009. – V. 107. – № 5. – P. 705–707.

Златов Андрей Сергеевич – СПбГУ ИТМО, студент, zlatov@oi.ifmo.ru; *Иванов Сергей Александрович* – СПбГУ ИТМО, студент, coolwolv@rambler.ru; *Приказов Максим Юрьевич* – СПбГУ ИТМО, студент, prikazov@ya.ru; *Корзинин Юрий Леонидович* – СПбГУ ИТМО, кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, korzinin@oi.ifmo.ru; *Никоноров Николай Валентинович* – СПбГУ ИТМО, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, nikonorov@oi.ifmo.ru

УДК 004.056.53

ИМПЛИКАЦИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ КАК ОСНОВА ВЕРИФИКАЦИИ

О.Ф. Немолочнов, А.Г. Зыков, В.И. Поляков

Рассматривается использование функций импликации и эквивалентности при верификации логических схем и программного продукта в процессе их проектирования и реализации.

Ключевые слова: проектирование, верификация, импликация, эквивалентность, вычислительный процесс.

Повышающиеся требования к качеству аппаратно-программных комплексов заставляют разработчиков уделять все большее внимание вопросам тестирования и верификации разрабатываемых изделий. Поэтому разработка моделей и эффективных методов анализа схем и программ является актуальной проблемой. К методам анализа аппаратуры и программных продуктов в первую очередь относятся верификация и тестирование.

При проектировании любого вычислительного процесса в виде логической схемы или программы всегда имеется два объекта, которые необходимо верифицировать: A – задание на проект (техническое задание или спецификация проекта) и B – реализация проекта (в виде логической схемы или программы).

При рассмотрении процесса проектирования между объектами A и B должно соблюдаться следующее соотношение: $A \subseteq B$, т.е. A должно содержаться в B . Отсюда следует, что $A \rightarrow B$. Соответственно, A есть достаточный, а B – необходимый признаки. Полная эквивалентность $A \equiv B$ может быть выдержана только в том случае, если $A \rightarrow B$ и $B \rightarrow A$, что, как правило, недостижимо [1].

Отношение $A \subset B$ возникает из-за различного характера допущений при конкретной реализации проекта и является характерным при использовании стандартных решений – заготовок, например, при использовании полузаказного проектирования для схем или CASE-технологий при программировании.

Основой верификации вычислительных процессов является переход к формализации функций импликации и эквивалентности на основе результатов вычислений. Сложность верификации вычислительных процессов, особенно в больших проектах, возникает из-за наличия ситуаций *don't care* и недеklarированных возможностей в проектах, которые необходимо обнаружить и локализовать [2]. Учет указанных ситуаций позволяет верифицировать исследуемые объекты с большей достоверностью и дает возможность диагностировать вычислительный процесс на возможность вирусного проникновения (заражения).

Особое место при верификации вычислительных процессов занимает верификация управляющих вычислительных систем, особенность которых заключается в том, что они работают в синхронизированном режиме, определяемом объектом управления. В этом случае может возникнуть явление состязаний сигналов, в том числе и критических, которые в обязательном порядке должны быть выявлены и устранены [3]. С другой стороны, появляется задача привязки асинхронных сигналов к вычислительному – управляющему процессу. Это приводит к появлению ждущих вершин и, соответственно, к приостановке вычислительного процесса и введению в него задержек, асинхронных по своей природе. Разрешение указанных противоречий необходимо проводить путем введения в вычислительный процесс синхросигналов с калиброванным по частоте расстоянием между ними, что и должно обеспечивать качество и, в конечном итоге, достоверность верификаций управляющих процессов.

Таким образом, импликация и эквивалентность (с учетом ситуаций *don't care* и недеklarированных возможностей, а также синхронизации в управляющих вычислительных процессах) являются основой верификации вычислительных процессов.

1. Импликация и неопределенные значения условий-предикатов вычислительных процессов / Немолочнов О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И. // Труды Международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» (AIS'08) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2008), Научное издание в 4-х томах. – М.: Физматлит, 2008. – Т. 1. – 400 с. – С. 140–145.
2. Метод обнаружения недеklarированных возможностей и *DON'T CARE* вычислительного процесса / Немолочнов О.Ф., Зыков А.Г., Кулагин В.С., Осовецкий Л.Г., Поляков В.И., Суханов А.В. // Известия вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 12. – С. 32–39.
3. Анализ и устранение критических состязаний сигналов при синтезе тестовых последовательностей / Немолочнов О.Ф. // А и Т. – 1976. – № 11.

Немолочнов Олег Фомич – СПбГУ ИТМО, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, nemolochnov_o_f@mail.ru; Зыков Анатолий Геннадьевич – СПбГУ ИТМО, кандидат технических наук, доцент, zukov_a_g@mail.ru; Поляков Владимир Иванович – СПбГУ ИТМО, кандидат технических наук, доцент, v_i_polyakov@mail.ru

УДК 517.958; 615.47:616-072.7

ОЦЕНКА СОРЕВНОВАТЕЛЬНОЙ ГОТОВНОСТИ СПОРТСМЕНА НА БАЗЕ МЕТОДА
ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Е.Н. Величко

На основании данных исследования спортсменов методом газоразрядной визуализации построена экстраполирующая функция, позволяющая прогнозировать уровень соревновательной готовности.

Ключевые слова: состояние спортсмена, уровень соревновательной готовности, газоразрядная визуализация.

Проведение обследований в спорте является актуальной задачей, при этом принципиально важным является вопрос оценки психофизиологического состояния спортсмена, проводимой на протяжении подготовительного и соревновательного периодов. Высокую практическую ценность при оценке психофизиологического состояния спортсменов показывает метод газоразрядной визуализации, позволяющий в реальном времени оценить психофизиологическое состояние спортсмена и уровень его соревновательной готовности [1]. Поставлена задача разработки принципов и алгоритмов прогноза уровня соревновательной готовности спортсменов. Сложность задачи заключается в том, что при работе с высококвалифицированными спортсменами количество экспериментальных точек невелико, что делает невозможным применение стандартных методов аппроксимации. В работе проводится анализ зависимости и построение экстраполяционных кривых с применением метода разведочного анализа и сплайн-аппроксимации. Разведочный анализ позволяет выявить наличие тренда, после чего проводится построение экстраполирующей кривой. Данная задача сводится к минимизации функционала

$$\Phi[\tilde{y}(x)] = \sum_{i=1}^k p_i [\tilde{y}(x_i) - y_i]^2 + \alpha \int_{x_1}^{x_k} [\tilde{y}''(x)]^2 dx \rightarrow \min,$$

где y_i – ординаты экспериментальных точек, $\tilde{y}(x)$ – функция аппроксимирующей кривой, p_i – веса, α – параметр регуляризации задачи. Параметры α и p_i рассчитываются на основании разработанного алгоритма, вес экспериментальной точки определяется в зависимости от вида тренировки.

Результатом решения задачи минимизации функционала является функция экстраполирующей кривой, которая строится для параметров относительного изменения энергетического потенциала и стрессового фона спортсмена. Параметры рассчитаны таким образом, что при возрастании экстраполирующей кривой дается положительный прогноз соревновательной готовности спортсмена, при спаде – отрицательный. Относительное изменение энергетического потенциала спортсмена в результате тренировки DE рассчитывается как отношение разницы значений параметров после и до тренировки к их сумме. На рисунке представлен пример экстраполирующей функции динамики изменения энергетического потенциала для спортсмена, имеющего положительный прогноз соревновательной готовности (при значении параметра регуляризации задачи $\alpha = 0,9$).

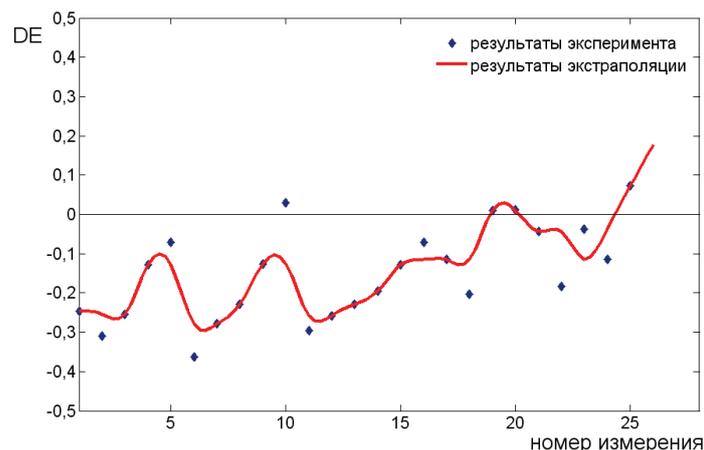


Рисунок. Динамика изменения параметра DE и результат экстраполяции

В результате работы была построена функция экстраполяции параметров относительного изменения энергетического потенциала и стрессового фона спортсменов, позволяющая прогнозировать соревновательную готовность спортсменов. Прогнозы хорошо согласуются с практическими результатами спортивной соревновательной деятельности [Л].

Л. Коротков К.Г., Короткова А.К., Петрова Е.Н., Шапин А.В. Результаты и перспективы внедрения инновационных технологий в системе детско-юношеского спорта и спорта высших достижений // Теория и практика физической культуры. – 2008. – № 3. – С. 36–40.

Величко Елена Николаевна – СПбГУ ИТМО, аспирант, heleonores@mail.ru

SUMMARY

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

OPTICAL SYSTEM OF VARIABLE MAGNIFICATION IN THE MICROSCOPE LIGHTING APPLIANCE

T. Tochilina

Efficiency analysis of the light flow use in the optical system lighting appliance of modern microscope was done. It is shown that parameters of observational and lighting branches of the microscope can be coordinated by including variable magnification system in the optical system of lighting appliance that will allow to increase tenfold the efficiency of the light flow use. A new approach to the construction of the optical system lighting appliance is necessary. Possible variants of such systems are considered, analytical correlations, defining the size of its components, are obtained.

Keywords: lighting device, condenser, collector, lens, light flow, eyepiece.

Tatyana Tochilina – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, tvtochilina@mail.ru

COMPUTATION OF OPTICAL CHANNEL WAVEGUIDE WITH ARBITRARY REFRACTIVE INDEX ALLOCATION USING B-SPLINE METHOD

G. Deineka, V. Serebryakova

The universal strategy of parameters computation for channel optical waveguide with arbitrary refractive index distribution is presented in this work. All calculations are performed from the first principle of reduced wave equation (Helmholtz's equation). The algorithm is based on the finite elements method using B-splines. Calculation results for channel waveguide with defined index profile and various geometrical configurations are represented as well. The comparison of the obtained results with the results by the known numerical methods is given too in this article.

Keywords: channel waveguides, refractive index profile, finite elements method, B-splines, computing modeling.

Gennady Deineka – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, gdeineka@yahoo.com

Vladlena Serebryakova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, vlladllena@mail.ru

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

THIRD HARMONIC GENERATION AT REFLECTION FROM CRYSTAL OF HIGH-INTENSITY FEMTOSECOND RADIATION

O. Mokhnatova, S. Putilin, V. Bespalov, S. Kozlov

Experimental results of the reflection of femtosecond radiation with a power density of 4 TWt/cm^2 and duration of $\sim 40 \text{ fs}$ from nonlinear crystal of LiF at light falling to medium boundary close to normal were presented. The generation of triple frequency radiation was observed at the reflection from the front face of the crystal. Spatial distributions of triple frequency beam and fundamental beam were recorded. Energy of triple frequency radiation was 10^{-4} of the energy of the incident radiation. Half-width of light beam spatial distribution on the triple frequency radiation happens to be three times narrower than fundamental beam half-width.

Keywords: extremely short light pulses, reflection of extremely short light pulses, nonlinear crystal LiF, generation of the third harmonic.

Olga Mokhnatova - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, o.mokhnatova@mail.ru

Sergey Putilin - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior Scientist, PhD, Senior Scientist, seputilin@yandex.ru

Victor Bespalov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Senior Scientist, victorbespaloff@gmail.com

Sergey Kozlov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru

DESIGN AND SIMULATION IN AVIONICS

AUTOMATED CONTROL SYSTEM DEVELOPMENT OF THE AIRCRAFT AVIONICS

Yu. Esin, P. Paramonov, Yu. Sabo

The information-model approach to automated control system development of the avionic navigating complexes is considered. Control functional diagram and the results of modeling are presented.

Keywords: equipment condition control, modeling.

Yury Esin - Federal State Unitary Enterprise «Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroavtomatica”» after P. A. Efimov, Assistant chief constructor, PhD., Professor, postmaster@elavt.spb.ru

Pavel Paramonov - Federal State Unitary Enterprise «Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroavtomatica”» after P. A. Efimov, Director, D.Sc., Professor, postmaster@elavt.spb.ru

Yury Sabo – Federal State Unitary Enterprise «Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroavtomatica”» after P. A. Efimov, Chief constructor, D.Sc., Professor, postmaster@elavt.spb.ru

MEASUREMENT ERRORS MODELING OF ONBOARD NAVIGATION DEVICES

D. Kozis, O. Zharinov, V. Suslov

The article deals with the approach to measurement errors modeling of onboard navigation systems on the basis of recursive generating filters application, definitely transforming white noise in an interference with the given correlation-spectral properties.

Keywords: the painted noise, generating filter.

Dmitry Kozis – ZAO «Russian Joint-stock Association “Spetztehnika”», Director, PhD, kozisd@mail.ru

Oleg Zharinov – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Associate professor, PhD, zharinov@hotmail.ru

Vladimir Suslov – Federal State Unitary Enterprise «Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroavtomatica”» after P. A. Efimov, Assistant director, postmaster@elavt.spb.ru

CRATE CREATION STRATEGY OF THE ONBOARD MULTIPROCESSING COMPUTING SYSTEM FOR THE FIFTH GENERATION AVIONICS

O. Zharinov, B. Vidin, R. Shek-Iovsepjantz

Creation strategy of the onboard digital computing system in a structure class of the integrated modular avionics is considered. Significant architectural attributes are defined. The model of computing system resources and three-stage hierarchical semicircle model are considered. Decomposition method of onboard computing system functional problems and their assignment for accessible computing resources are considered.

Keywords: creation strategy, the onboard computing system, crate.

Oleg Zharinov – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Associate professor, PhD, zharinov@hotmail.ru

Boris Vidin – Federal State Unitary Enterprise «Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroavtomatica”» after P. A. Efimov, Deputy Chief constructor, PhD, Professor, postmaster@elavt.spb.ru

Ruben Shek-Iovsepjantz – Federal State Unitary Enterprise «Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroavtomatica”» after P. A. Efimov, Chief constructor, D.Sc., Professor, postmaster@elavt.spb.ru

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

RESTORATION OF NOISY IMAGES BLURRED ANGULARLY WITHOUT BOUNDARY CONDITIONS

M. Daineko, V. Sizikov

We consider the reconstruction problem of noisy images blurred angularly in this paper. We use an algorithm on the basis of the quadrature method and Tikhonov regularization method for such image restoration. For blurred image reconstruction the new truncation method and edge blurring method without “boundary conditions” are proposed.

Keywords: images blurred angularly, image reconstruction, Tikhonov regularization method, boundary conditions.

Marya Dayneko – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, daynekom@gmail.com

Valery Sizikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, sizikov2000@mail.ru

THE PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE TELESCOPE AZIMUTH AXIS BLDC ELECTRIC DRIVE

A. Il'ina

The parametric identification process of the high torque gearless precision electric drive used in the telescope axis rotating system is described. As a result the parameters of electric drive mathematical model were generated making it possible to approximate mathematical model features to control object features.

Keywords: precision electric drive, parametric identification.

Aglaya Il'ina - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. research fellow.

DYNAMIC OBSERVATION OF NON-LINEAR BINARY DYNAMIC SYSTEM

A. Ushakov, E.Yaitskaya

The dynamic observation concept transfer developed with reference to the discrete systems over infinite fields to the systems over finite binary Galois fields. Authors have concentrated the attention to dynamic observing realization over a condition of non-linear binary dynamic systems (BDS) taking into account decision practice of

this problem for linear BDS case. The task is dared in three stages: linearization of nonlinear BDS, formation of dynamic observing process of linearized BDS and observing division over a condition of initial nonlinear BDS. The example is supplied.

Keywords: binary dynamic system, linear, non-linear, linearization, dynamic observation, Sylvester matrix equation, convergence rate, nilpotency index.

Anatoly Ushakov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D. Sc., Professor, ushakov-AVG@yandex.ru

Elena Yaitskaya - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, yaitskayaes@mail.ru

MECHANICS AND MECHATRONICS

DEFINITION OF THE STEADY STATE VIBRATION ISOLATION SYSTEMS WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

S. Ivanov

For research of vibration isolation systems a qualitative and quantitative analysis of corresponding mathematical models is necessary. The system of the ordinary differential equations is taken as a model which includes nonlinear characteristics in the form of polynomials from phase variables with constant and periodic parameters. The method of polynomial transformations is used in the analysis of nonlinear vibration isolation systems which allows gaining detailed enough qualitative and quantitative dynamic characteristics of systems.

Keywords: vibration isolation system, steady regime of oscillations, nonlinear system with two degrees of freedom.

Sergey Ivanov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, SIvanov@mail.ifmo.ru

CONTACT INTERACTION ANALYSIS IN THE MICROMECHANICAL GYROSCOPES

M. Evstifeev, D. Rozentsveyn

Micromechanical gyroscopes applications on the highly dynamic objects with the significant inertia impact loads are examined. It is shown that such impacts lead to contact interactions of the construction elements. The results of deformation and strain calculation were derived for elastic suspension under the condition contact interaction between stoppers and inertial body. Stoppers configuration was designed based on strength criterion grounds for elastic suspension.

Keywords: micromechanical gyroscope, elastic suspension, impact, contact, stopper.

Mikhail Evstifeev - Concern "CSRI Elektropribor", JSC, Head of Design Department, Dr. Sc., Associate professor, evstifeevm@mail.ru, office@eprib.ru, mevstifeev@eprib.ru

Dmitry Rozentsveyn - Concern "CSRI Elektropribor", JSC, research engineer, Rosenzwein@mail.ru, office@eprib.ru

THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING

THERMAL ANALYSIS OF ELECTRONIC COMPONENTS ON PRINTED CIRCUIT BOARD

G. Biryulin, V. Egorov, S. Murov

We developed new finite differences algorithm for calculating the temperature of electronic component housings mounted on printed circuit board. The results have been compared with a similar program, which implements analytical method.

Keywords: electronic radio equipment, printed circuit board, numerical simulation, finite differences method, thermal conditions.

Gavriil Biryulin - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, gavrila@bk.ru

Vladimir Egorov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, ktf@grv.ifmo.ru

Svyatoslav Murov – Research and Production Company OAO «BNT Priboy», Engineer, ncdf@mail.ru

MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

INVESTIGATION OF LANTHANUM GALLATES BY X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS

O. Pshenko, L. Pyankova

The work deals with the study of phase composition of poorly-type semiconductors - Lanthanum Gallates Perovskite (LaGaO_3) doped with a touch of Co^{3+} (up to 10%) by X-ray diffraction analysis. Comparative analysis of X-ray pictures shows that cobalt impurity concentration growth in the mixed crystals $\text{LaGaCo}_x\text{O}_3$ leads to insufficient deformation of cubic crystal lattice with the decrease of elementary cell parameter by 0, 03 nm. Nevertheless, in Lanthanum gallates the local symmetry decrease is possible and it becomes apparent on X-ray pictures as diffraction maximum splitting.

Keywords: Lanthanum gallates, X-ray analysis, doped semiconductors, perovskite structures, qualitative analysis of semiconductors.

Olga Pshenko - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, Zubanova_OA@mail.ru

Lyubov P'yankova – JSC “Scientific Instruments”, methodologist, lyuba_pyan@mail.ru

ION LITHOGRAPHY APPLICATION FOR NANOSCALE CHANNEL FORMATION IN GLASS MICROFLUID CHIPS

A. Evstrapov, I. Mukhin, I. Kukhtevich, A. Bukatin

Etching processes of K8 glass with gold, carbon and chrome coatings are investigated. It is shown that the minimal reproducible size of focused ion etching micro channel is 40 nm. Experimental microfluid chip prototype with nanochannels for biological probes fixation and investigation are obtained.

Keywords: micro- and nanostructures, microfluid chip, ion lithography, magnetron sputtering, electron microscopy, ion microscopy.

Anatoly Evstrapov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Scientific researcher, an-evs@yandex.ru

Ivan Mukhin – Saint Petersburg Academic University Scientific Educational Center of Nanotechnologies RAS (SPb AU SECNT RAS), Postgraduate, junior scientist, imukhin@yandex.ru

Igor Kukhtevich – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, ba@inbox.ru

Anton Bukatin - Saint Petersburg Academic University Scientific Educational Center of Nanotechnologies RAS (SPb AU SECNT RAS), Student, antibuk.fiztek@gmail.com

PROBE FOR SCANNING ION-CONDUCTANCE MICROSCOPY

A. Golubok, V. Levichev, V. Matyzhonok, A. Stovpyaga

The piezoelectric sensor for scanning probe microscope with a probe in the form of a glass micropipette for scanning ion-conductance microscopy has been made. Resonant frequency and Q-quality of the sensor have been measured in the air and liquid environments. Nanotip has been created for spatial resolution improvement of a microprobe by means of the focused ion beam at a pipette butt end. Using a test grid, the spatial resolution of a microprobe with nanotip is shown. The conclusion about an opportunity of using the sensor with a micropipette in the liquid environment with simultaneous activity in semi contact force mode and in a mode of measurement of ionic currents has been made.

Keywords: scanning ion-conductance microscope, micropipette.

Alexander Golubok – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of nanotechnologies and materials technology department, D.Sc., golubok@ntspb.ru

Vadim Levichev - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Lecturer, levichev_vadim@mail.ru

Victor Matyzhonok – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, victoor@yandex.ru

Alexander Stovpyaga – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, sanja100v@mail.ru

MICRO- AND NANOMODIFICATION OF A METAL LAYER ON A POLYMERIC SUBSTRATE IN DYNAMIC AND STATIC FORCE LITHOGRAPHY MODE

A. Pinaev, A. Golubok

The surface of Au 20 nm thickness film on a polycarbonate substrate has been modified by dynamic force lithography (DFL) method. The ~ 100nm spatial resolution has been obtained. It is shown that the spatial resolution of a method is defined by radius of used probes. The optimum mode at which the W probe completely cuts a metal film is defined. The factors influencing the process of surface modification by DFL method are discussed. The two-dimensional diffraction lattice with ~500 nm spatial period has been made. The lattice structure has been studied by means of the scanning semicontact force microscopy, scanning electron microscopy and optical confocal microscopy. The conclusion on creation possibility of nanoelectronic, nanophotonic and nanosensoric elements in metal-polymeric systems by DFL method has been made.

Keywords: scanning probe microscopy, lithography, dynamic force lithography.

Alexander Pinaev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, pinaich@mail.ru

Alexander Golubok - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of nanotechnologies and materials technology department, D.Sc., golubok@ntspb.ru

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES MATROIDAL REPRESENTATION FOR THE ADJACENCY GRAPHS FAMILY BUILT ON A SET OF KNOWLEDGE PATTERNS

V. Oparin, A. Filchenkov, A. Sirotkin, A. Tulup'yev

The paper considers a problem appeared in machine learning of uncertain knowledge patterns bases represented as algebraic Bayesian networks. The problem is to build an adjacency graph as a representation of a global (secondary) structure of such a network using its primary structure. Under the given primary structure of an

algebraic Bayesian network, the corresponding adjacency graphs family can be characterized with a special matroid. It leads to further results: the sets of minimal adjacency graphs and non-reducible join graphs are equal; a minimal adjacency graph can be built with a greedy algorithm; the vertices number of minimal adjacency graph can be expressed with the vertices number of maximal adjacency graph and the matroid rank.

Keywords: knowledge patterns bases, algebraic Bayesian networks, machine learning, global structure, matroid, adjacency graph.

Vsevolod Oparin - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, oparin.vsevolod@gmail.com

Andrey Filchenkov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, aaafil@mail.ru

Alexander Sirotkin – Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, Junior research fellow, avs@iiias.spb.su

Alexander Tulup'yev - Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, Laboratory Head, D. Sc., Associate professor, ALT@iiias.spb.su; ALT4488@peterstar.ru

PACKAGE OF SEMIFORMALIZED MODELS OF IMITATING MODELING SYSTEM

E. Malysheva, S. Goldshtein

The article is devoted to creation of conceptual, structural model and updating of algorithmic models of imitating modeling system. The purpose of modeling is consulting support during the problem situations in the organization activity.

Keywords: imitating modeling system, conceptual, structural and algorithmic models.

Ekaterina Malysheva – Ural State Technical University – UPI named after the first President of Russia B. Yeltsin, Postgraduate, katyona@bk.ru

Sergey Goldstein - Ural State Technical University - UPI named after the first President of Russia B. Yeltsin, Department Head, D.Sc., Professor, vtsl@dpt.ustu.ru

CODE SCALES ON THE BASIS OF NONLINEAR SEQUENCES FOR CONVERTERS OF ANGULAR MOVEMENTS

A. Ozhiganov, P. Pribytkin

Construction approach of one-track code scales is considered on the basis of nonlinear binary sequences for converters of angular movements. An example of scale construction with the offered method is given.

Keywords: M-sequence, nonlinear sequence, code scale, reading elements.

Alexander Ozhiganov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, ojiganov@mail.ifmo.ru

Pavel Pribytkin – “Avangard”, JSC, Project manager, pavel.pribitkin@gmail.com

SPECIAL VLSI FOR VIDEO DATA CONVERSION

A. Umbitaliev, N. Shipilov, S. Ibatullin, Sh. Fahmi

The new approach to distribution of a compression video content with simultaneous use of two alternative compression technologies of moving images is considered: 1) on the basis of three-dimensional discrete cosine transformation (this technology is not standardized for today) and 2) on the basis of two-dimensional discrete cosine transformation of the digital television signal (realized in standards MPEG-2, MPEG-4 and H.264). Within the limits of the specified approach the method of fast transcoding of the main video data stream compressed by three-dimensional discrete cosine technology of transformation in a compression stream of MPEG-2 standard is proposed.

Keywords: discrete cosine transformation (DCT), IP-core, transcoder.

Alexander Umbitaliev - Federal State Unitary Enterprise “Television Research Institute”, Director, D. Sc., Professor, niitv@niitv.ru

Nikolay Shipilov – Federal State Unitary Enterprise “Television Research Institute”, Deputy director for innovative activity, PhD, Professor, niitv@niitv.ru

Salekh Ibatullin – Federal State Unitary Enterprise “Television Research Institute”, engineer, NPK41@LENTA.ru

Shakeeb Fahmi - Federal State Unitary Enterprise “Television Research Institute”, Leading research scientist, PhD, Associate professor, Shakeebf@mail.ru

AUTOMATIC SUMMARY NEWS ABSTRACTING

S. Tarasov

A review of modern methods and algorithms of summary abstracting is given. The main disadvantages of these methods are substantiated. Requirements for a method that could overcome these shortcomings are described. The method developed by the author for thematically related ranking to automatic summary abstracting is considered in the article. As the effectiveness evidence of the developed method, experimental evaluation results of the obtained summary abstracts quality are described.

Keywords: summary abstracting, automatic creation of abstracts, summary, methods and algorithms of automatic summary abstracting.

Sergey Tarasov – Baltic State Technical University “Voenmekh”, Assistant, tarasov_sd@mail.ru

BIOMEDICAL TECHNOLOGIES

NUMERICAL MODELING OF VENA CAVA FILTER PLACEMENT AND ITS EFFECT ON HAEMODYNAMICS

Yu. Ivanov, T. Dobroserdova

Modeling of blood vascular system is a wide field for scientific efforts and includes a large number of aspects. In this regard it is reasonable to investigate separately the vascular wall structure and its response to deformation. We implement the fiber model based on biological features of vascular wall structure, suggested by Charles Peskin [6]. We consider the model calibration issue with special input data - equations of vessel state. The main part of the work we devote to interaction of elastic fiber model and global blood circulation model. Models interaction makes it possible to research an effect of vena cava filter placement on haemodynamics.

Keywords: embolism, transmural pressure, equation of vessel state, vena cava filter.

Yury Ivanov - M. V. Lomonosov Moscow State University, student, yura-vtm@yandex.ru

Tatyana Dobroserdova - M. V. Lomonosov Moscow State University, student, zdrapa@mail.ru

COMPUTATIONAL ASPECTS OF TUBERCULOSIS SPREAD SIMULATION

V. Leonenko, K. Loginov

Performance increasing approaches of the modeling program for individual-based model of tuberculosis spread are considered in the paper. The computational algorithms optimization process and also the usage of distributed computing based on MONC system and parallel computations based on OpenMP technology are described. The results of computational experiments are listed.

Keywords: simulation, epidemiology, distributed computing, parallel programming.

Vasily Leonenko - Omsk Branch of Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Postgraduate, VNLeonenko@yandex.ru

Konstantin Loginov - Omsk Branch of Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Postgraduate, kloginov85@mail.ru

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

CONCEPTUAL MODEL FOR THE EXTRACTION OF LEARNING OUTCOMES FROM THE EXCESSIVE EDUCATION CONTENT

V. Vasilev, L. Lisitsyna, A. Shehonin

A conceptual model for a two-step extraction of learning outcomes (LO) and their competencies from the excessive content of education is given. The basic methodology for constructing models of the hierarchy of LO and the educational process at their base are described. The effective approaches for the application of basic techniques, allowing to specify the activities in the competence based on macrotrajectory between LO, and to carry out a phased development of the elementary (indivisible) LO are considered. The connection between the proposed models with the structure and implementation plan of modular educational programs is shown.

Keywords: conceptual model, learning outcomes, competencies, educational trajectory.

Vladimir Vasilev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Rector, D.Sc., Professor, rector@mail.ifmo.ru

Lyubov Lisitsyna - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D.Sc., Associate professor, lisizina@mail.ifmo.ru

Alexander Shehonin - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Vice-rector, D.Sc., Professor, shehonin@aco.ifmo.ru

FROM THE HISTORY OF SCIENCE AND TECHNIQUE THE ORIGIN OF OPTICAL PRODUCTION IN PRE-REVOLUTIONARY RUSSIA (I. Ya. URLAUB FACTORY OF OPTICAL INSTRUMENTS)

N. Kamenskaya

The article discusses the problems associated with the emergence of optical production in Russia in the late XIX - early XX centuries in terms of post-reform economy. These problems were not adequately described in literature. This article is intended for everyone interested in the history of the origin of domestic optical industry.

Keywords: optical industry, industrial development, I.Ya. Urlaub factory of optical instruments.

Nadezhda Kamenskaya - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, nkamenskaya@mail.ru

ABOUT SKILLED PERSONNEL TRAINING FOR THE RUSSIAN INDUSTRY AT THE TURN OF XIX-XX CENTURIES (MEETINGS OF RUSSIAN PERSONALITIES ON PROFESSIONAL AND TECHNICAL EDUCATION)

O. Kuzmina

The article deals with the problems devoted to skilled workers training for the Russian industry in the late XIX – early XX centuries in the post-reform economy conditions. Empire Russian Technical Society paid much attention to those problems and organized three meetings. The article is aimed for everyone interested in the history of professional domestic education in Russia.

Keywords: professional education, technical education, industrial development.

Olga Kuzmina - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, PhD, Associate professor, kuzminao@mail.ru

BRIEF REPORTS

SELECTION AND ANALYSIS METHODS FOR KEY PARAMETERS OF LOW-LEVEL MULTISPECTRAL SYSTEMS FOR VISIBLE AND SHORT-WAVE INFRARED RANGES

E. Yarotskaya

This brief report gives an account of the primary results of multispectral systems for visible and short-wave infrared ranges research.

Keywords: electron-optical transformer, hybrid-module image converter, low-level multispectral electron-optical system.

Ekaterina Yarotskaya - Moscow State University of Geodesy and Cartography (MSUGK), Postgraduate, katrinyaya@yandex.ru

IMAGE LINEAR SHIFTS AND ROTATION ANGLE ESTIMATION FOR ELECTRONIC OPTICAL SYSTEM MOVEMENT RELATIVELY TO OBSERVABLE SCENE

A. Polyakov, V. Treskov, V. Demidov

Proposed estimation method allows to accurately calculating linear shifts and rotation angle between two consequent frames, obtained by electronic optical system moving relatively to observable static scene.

Keywords: iterative image analysis, interframe transformation model.

Alexander Polyakov - Central Research Institute "Cyclone", JSC, engineer, apolyakov1985@rambler.ru

Victor Treskov - Central Research Institute "Cyclone", JSC, chief programmer, dep140@yandex.ru

Vladimir Demidov - Central Research Institute "Cyclone", JSC, Head of the laboratory, PhD, demidovvova@yandex.ru

OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS FOR INDUSTRIAL BUILDINGS MONITORING ACCORDING TO THEIR ELEMENTS POSITION

S. Mikheev, K. Arakantsev, T. Kopylova

The schemes of the optical-electronic system construction for industrial buildings monitoring are investigated. The system consists of television channel set with overlaying angular fields and active markers of the checkpoints.

Keywords: optical-electronic system for the buildings monitoring.

Sergey Mikheev - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, msv@grv.ifmo.ru

Konstantin Arakantsev - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, kostya3312@mail.ru

Tatyana Kopylova - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, oeps@grv.ifmo.ru

MULTIPLEX HOLOGRAMS ON PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS

A. Zlatov, Yu. Korzinin, N. Nikonorov

Feasibility of making multiplex phase volume holograms based on the silicate photo-thermo-refractive glass has been considered.

Keywords: holography, multiplex elements, photo-thermo-refractive glass.

Andrey Zlatov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, zlatov@oi.ifmo.ru

Yuri Korzinin - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, korzinin@oi.ifmo.ru

Nikolay Nikonorov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, nikonorov@oi.ifmo.ru

THERMAL TREATMENT INFLUENCE ON REFRACTIVE INDEX OF PHASE VOLUME HOLOGRAMS BASED ON SILICATE PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS

A. Zlatov, S. Ivanov, M. Prikazov, Yu. Korzinin, N. Nikonorov

Modulation magnitude dependence of the first harmonic of refractive index of volume phase holograms based on the silicate photo-thermo-refractive glass after thermal treatment has been investigated.

Keywords: holography, thermal treatment, photo-thermo-refractive glass.

Andrey Zlatov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, zlatov@oi.ifmo.ru

Sergei Ivanov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, coolwolv@rambler.ru

Maksim Prikazov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, prikazov@ya.ru

Yuri Korzinin - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, korzinin@oi.ifmo.ru

Nikolay Nikonorov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, nikonorov@oi.ifmo.ru

IMPLICATION AND EQUIVALENCE AS A BASIS FOR VERIFICATION

O. Nemolochnov, A. Zykov, V. Polyakov

The article deals with implication and equivalence functions used for verification of logical circuits and software products in the course of their design and implementation.

Keywords: design, verification, implication, equivalence, computation process.

Oleg Nemolochnov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, nemolochnov_o_f@mail.ru

Anatoly Zykov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, zykov_a_g@mail.ru

Vladimir Polyakov - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate professor, v_i_polyakov@mail.ru

EVALUATION OF SPORTSMAN COMPETITION PREPAREDNESS BASED ON GAS DISCHARGE VISUALIZATION METHOD

E. Velichko

Extrapolation function for competition preparedness prediction based on gas discharge visualization method investigation of sportsmen is presented.

Keywords: sportsman state, prediction of competition readiness, gas discharge visualization.

Elena Velichko – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, heleonores@mail.ru

Уважаемые читатели!

«Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО» издается с 2001 года как периодическое научное и научно-образовательное издание. Журнал входит в утвержденный Высшей Аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук». Все публикации в журнале проходят рецензирование. Периодичность издания составляет 6 выпусков в год, объем каждого выпуска - 120 страниц.

Журнал печатает материалы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения и новых информационных технологий в России и за рубежом по следующим направлениям: информационные технологии, информационно-телекоммуникационные системы, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, системный анализ и математическое моделирование, системы автоматизированного проектирования, оптика, оптотехника и приборостроение, физика твердого тела, микроэлектроника, нанотехнологии, мехатроника, методы и системы защиты информации, биомедицинские технологии, экономика и финансы.

Издание зарегистрировано как сериальное в Международном центре ISSN, номер ISSN 1819-222X, свидетельство МНС РФ 1027806868154 от 24 января 2005 года, а также в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ ФС77-33466 от 10 октября 2008 года.

На журнал «Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО» можно оформить подписку в любом отделении связи, а также в редакции журнала (Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, комн. 330). Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать (Газеты. Журналы).

Сайт журнала <http://books.ifmo.ru/ntv/>