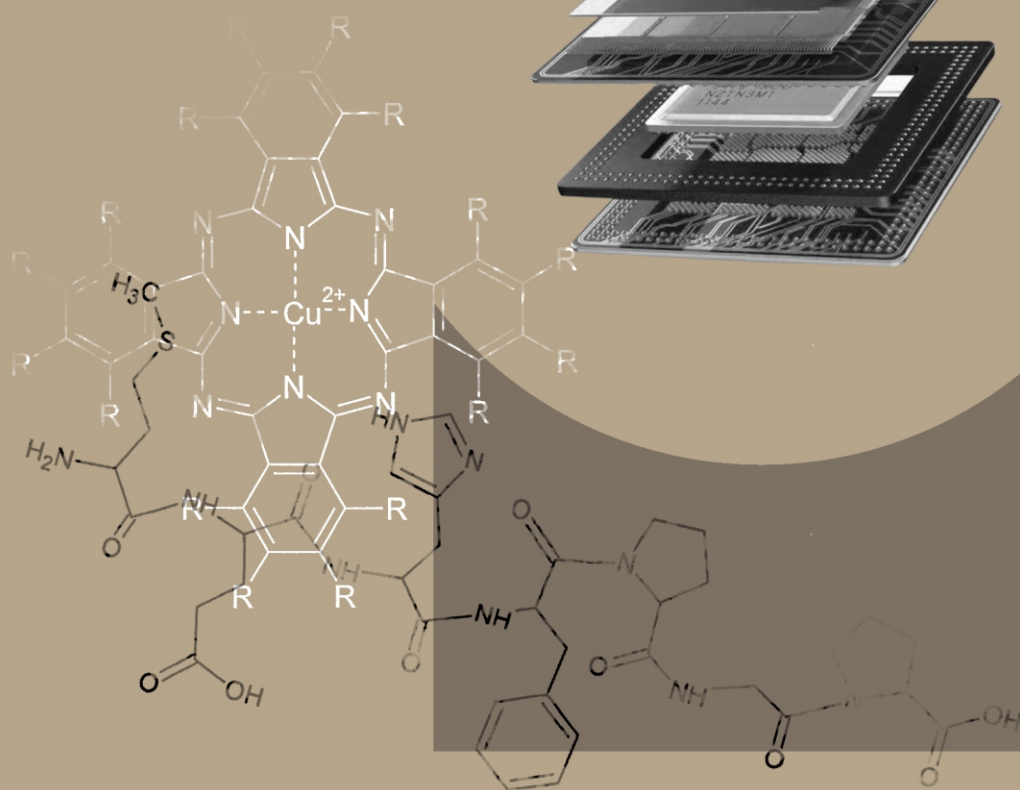


СБОРНИК РАБОТ АСПИРАНТОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО,
победителей конкурса грантов
Правительства Санкт-Петербурга

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2015 г.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. В.О. Никифорова – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 236 с.

Сборник содержит работы аспирантов Университета ИТМО, удостоенных премии Правительства Санкт-Петербурга, победителей конкурса грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Научные отчеты по результатам выполнения грантов издаются с целью демонстрации достижений аспирантов университета, стимулирования их участия в научных исследованиях, повышения качества подготовки специалистов с высшим образованием и формирования резерва для кадров высшей квалификации.

ISBN 978-5-7577-0496-8

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, 2015

Авторы, 2015

Награждение победителей конкурса грантов 2014 года для студентов и аспирантов вузов



В настоящее время Университет ИТМО располагает научными кадрами и развитой научно-исследовательской и инновационной инфраструктурой, обеспечивающими проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

В вузе действует система финансовой поддержки научных достижений молодых ученых. Они имеют возможность публиковаться в четырех научных журналах, выходящих на базе университета: «Известия вузов. Приборостроение», «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики», «Оптический журнал» и «Наносистемы: физика, химия, математика», и трех электронных изданиях: Научный журнал Университета ИТМО Серии «Процессы и аппараты пищевых производств», «Экономика и экологический менеджмент», «Холодильная техника и кондиционирование».

Важную роль в поддержке научных исследований молодежи играет ежегодный конкурс грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Аспиранты Университета ИТМО на протяжении всех лет существования этого конкурса принимают в нем активное участие, благодаря чему по общему числу выигранных грантов наш университет в последние годы занимает второе место среди всех вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга. Число победителей конкурса грантов в 2013 году составило 43 человека, а в 2014 года возросло до 62.

В настоящий сборник вошли работы аспирантов-победителей конкурса грантов 2014 года. Работы демонстрируют высокий уровень и широкий диапазон научных исследований, проводимых молодыми учеными Университета ИТМО под руководством ведущих специалистов вуза.

Проректор, д. т. н., проф. В.О. Никифоров

СОДЕРЖАНИЕ

Исследование и разработка лабораторной адаптивной оптико-электронной системы анализа минеральных объектов оптическим методом <i>А.А. Алехин</i>	7
Люминесцентные свойства комплексов меди в неорганических наноструктурированных стеклах различного состава <i>А.Н. Бабкина</i>	12
Разработка системы эталонного тестирования алгоритмов цифрового маркирования неподвижных изображений <i>В.А. Батура</i>	17
Разработка полуавтоматической системы идентификации дикторов по голосу <i>Е.В. Булгакова</i>	22
Обоснование выбора метода исследования форм нахождения тяжелых металлов в абиотических компонентах экосистемы <i>Е.А. Быковская</i>	26
Исследование методов комплексирования изображений многоспектральных оптико-электронных систем <i>А.С. Васильев</i>	32
Формирование вычислительной эпистемологии: историко-методологический анализ базовых понятий и оценка перспектив взаимодействия с современными когнитивными науками <i>Е.А. Васильев</i>	37
Адаптивное управление удаленными объектами по динамическому каналу связи <i>А.А. Ведяков</i>	40
Исследование и расчет оптической системы «промоскопа» <i>Н.Ю. Гришина</i>	42
Перенос энергии в системах на основе квантовых точек и молекул тетрапироллов в полимерных трековых мембранах <i>Ю.А. Громова</i>	46
Исследование и разработка алгоритмов построения прогнозных многопараметрических моделей на основе экспериментальных данных <i>С.П. Дмитриева</i>	48
Разработка основ композиции оптических систем различного назначения на основе двухкомпонентной схемы <i>В.В. Ежова</i>	53
Исследование оптических и лазерных свойств фото-термо-рефрактивных стекол активированных редкоземельными элементами <i>С.А. Иванов</i>	59
Разработка высокоскоростного квантового генератора случайных чисел <i>А.Е. Иванова</i>	62
Метод и модель управления информационной безопасностью на основе теории построения экспертных систем <i>А.С. Исаев</i>	67
Сборка контигов геномных последовательностей на основе принципа максимального правдоподобия <i>С.В. Казаков</i>	72
Сравнительно-правовое исследование форм государственного устройства современности <i>Н.А. Касаткина</i>	78
Разработка и исследование двухволнового дифракционного способа измерения расстояния до объекта <i>В.Е. Киреевков</i>	82
Исследование принципов тестирования бортовых цифровых вычислительных систем перспективных летательных аппаратов <i>Е.В. Книга</i>	87

Разработка математической модели, алгоритмов и прототипа программного комплекса для моделирования конформационной подвижности белков <i>С.Н. Князев</i>	92
Обоснование эффективности прессования макаронных изделий в поле ультразвука <i>Е.В. Кобыда</i>	98
Анализ абберационных свойств поверхностей в оптических системах <i>А.С. Ковалева</i>	101
Разработка методики оценки знаний пользователей системы дистанционного обучения на основе методов обработки семантических данных <i>Ф.А. Козлов</i>	106
Разработка протеза человеческой кисти с вибротактильной обратной связью <i>С.В. Кривошеев, И.И. Борисов</i>	110
Повышение разрешающей способности спектральных приборов с помощью математической обработки спектров <i>А.В. Кривых</i>	115
Разработка методов и алгоритмов повышения эффективности моделирования печатных узлов <i>О.В. Кузнецова</i>	121
Разработка математических моделей упругих чувствительных элементов систем управления в статическом и динамическом режимах <i>Р.Я. Лабковская</i>	128
Эталонные решения гидродинамических уравнений при малых числах Рейнольдса <i>И.В. Макеев</i>	134
Методы структурного анализа изображений трехмерных сцен с использованием гистограмм ключевых точек <i>Р.О. Малашин</i>	138
Исследование сходимости результатов атомно-эмиссионного спектрального анализа компонентов углеродистых и легированных сталей на спектрометре с пзс-линейками <i>А.А. Марцуков</i>	143
Теоретические и экспериментальные исследования элементов конструкции сканирующих зондовых микроскопов для оценки метрологических параметров биологических объектов по их изображениям <i>М.А. Михайлов</i>	147
Исследование возможности применения линий инверсии фазы светового поля для проведения линейных и угловых измерений <i>М.Д. Носова</i>	152
Лабораторный оптико-электронный комплекс для отработки принципов автоматической сортировки различных объектов <i>Н.А. Павленко</i>	159
Разработка формата представления данных региональных бюджетов <i>О.В. Пархимович</i>	164
Исследование и разработка принципов проектирования светодиодных источников света с заданными параметрами излучения <i>В.С. Перетягин</i>	169
Описание процессов фазового структурирования в комплексных полимерных системах <i>А.В. Подшивалов</i>	174
Численные методы для задачи Стокса с высокими контрастами вязкости <i>А.И. Попов</i>	179

Разработка стеклянно-полимерного микрофлюидного чипа для экспресс-анализа биомолекул методом электрофореза <i>Я.С. Посмитная</i>	184
Разработка алгоритма контроля качества паяных соединений жидкостных ракетных двигателей <i>Д.С. Сергеев</i>	190
Обобщенные средние В.А. Стеклова в задаче восстановления данных по известным значениям в узлах <i>Е.И. Сергеева</i>	194
Разработка метода восстановления фрагментов генома с доказуемым качеством <i>А.А. Сергушичев</i>	197
Формирование механизма оценки социальной активности студентов вузов <i>Л.В. Силакова</i>	203
Разработка методов и устройств для контроля преобразователей угловых перемещений <i>Н.В. Смирнов</i>	207
Метод расчета распределения параметров по глубине добывающей скважины для программно-аппаратного комплекса по подготовке специалистов по освоению российского континентального шельфа <i>Р.И. Смирнов</i>	211
Исследование возможностей создания новых приборов для контроля малых угловых и линейных перемещений на основе схемы дифракционного интерферометра <i>Ю.А. Соколов</i>	215
Исследование влияния морской качки на систему управления телескопа <i>С.А. Тушев</i>	221
Система «интерактивное стекло» с использованием распознавания жестов для высших учебных заведений <i>Н.Н. Филатова</i>	227
Исследование возможности применения ультразвуковой интенсификации биотехнологических процессов в производстве ферментированных молочных продуктов <i>Б.С. Шершенков</i>	233



Алехин Артем Андреевич
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: alekhin.a.a@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ АДАПТИВНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА МИНЕРАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А.А. Алехин

Научный руководитель – старший научный сотрудник А.Н. Чертов

В связи с непрерывным истощением запасов руд твердых полезных ископаемых использование различного рода автоматизированных систем обогащения минерального сырья является неперенным условием повышения эффективности его добычи. Однако существующие традиционные методы и технологии зачастую не способны обеспечить рентабельность освоения месторождений. Поэтому немаловажную роль играет поиск и внедрение новых, более эффективных методов обогащения.

Одним из них является метод оптической сортировки (известен еще как фотометрический или колориметрический). Он основан на регистрации цветовых различий анализируемых объектов в реальном времени. Применяется при производстве алюминия, для сортировки фруктов и овощей, промышленных и других отходов и т. д. Он также используется в горнодобывающей промышленности некоторых стран мира при добыче золота [1–3], алмазов [4, 5], никеля [6], кальцитов [7], полевых шпатов и других твердых полезных ископаемых. Но в отечественной практике, за исключением отдельных работ, отсутствуют публикации, посвященные возможностям методов цветового анализа твердых полезных ископаемых и реализующему их оборудованию.

На рынке обогатительного оборудования в настоящее время наиболее широко представлены оптические сортировщики немецких фирм ALIUD GmbH (сепараторы Optosort), Mogensen GmbH (сепараторы MikroSort), CommoDas GmbH (сепараторы UltraSort) и другие.

Однако результаты анализа, полученные на подобном оборудовании, с точки зрения решения задач, связанных с цветом и анализом цветовой картины, нельзя считать объективными. В данном оборудовании осуществляется не анализ цветов минералов как присущих им характеристик, а измерение некоторых цветовых координат их изображений в выбранной модели описания цвета (RGB, YUV, HLS и другие). RGB-система в силу своей неравномерности не является объективной с точки зрения анализа цвета [8].

Поэтому метод часто оказывается несостоятельным при анализе, слабоконтрастного материала. Кроме этого, до сих пор не существует критериев, на основании которых возможно осуществлять хотя бы предварительный выбор в пользу того или иного производителя обогатительного оборудования без проведения испытаний (прямого опробования модели сепаратора на конкретном типе руды).

По данной причине автором проводятся исследования с целью устранения указанных недостатков оптического метода обогащения и его дальнейшего развития. Одной из ключевых задач является разработка оптико-электронной системы для углубленного анализа руд твердых полезных ископаемых. Данная система призвана осуществлять предварительную оценку возможности и эффективности оптической сепарации определенного вида руды на разных типах сепараторов. Это позволит без прямого опробования (транспортировки сепаратора к месторождению или представительной пробы руды к месту размещения сепаратора) выбрать среди оптических сепараторов наиболее

подходящий для обогащения руды конкретного месторождения. Возможно также оптимизировать временные и денежные ресурсы на покупку и настройку сепаратора для работы с конкретной рудой, поскольку разрабатываемая система призвана в том числе определять настройки для уже существующих сепараторов.

В общем случае объекты анализа представляют собой многосложные неоднородные по составу структуры (рис. 1).

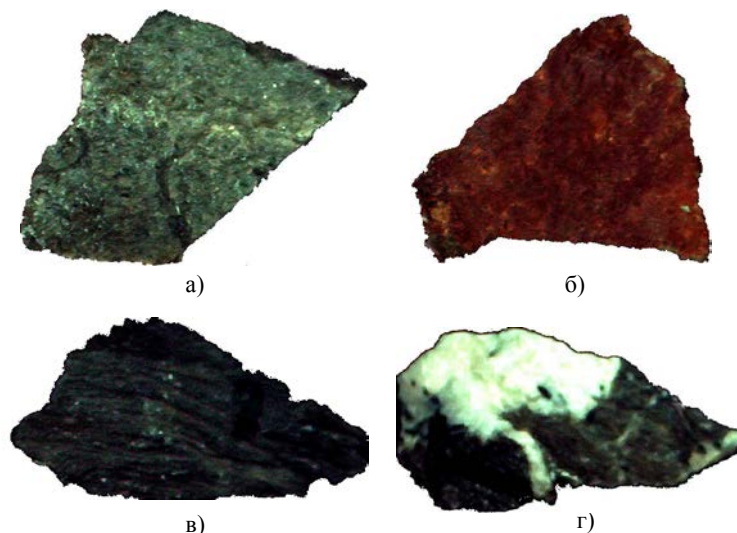


Рис. 1. Образцы руды месторождения «Коневинское»: а – березит; б – окисленный березит; в – гранодиорит; г – кварц (светлая часть) с включениями других пород (темная)

Как видно из рисунка, такие минеральные образцы отличаются непосредственно по цвету: у кварца он белый (темное в кварце – это включения другой породы), а у окисленного березита присутствуют оттенки красного. Поэтому данную группу минералов можно сортировать оптическим методом именно по цветовым характеристикам их цифровых изображений.

В ходе работы были определены дополнительные селективные признаки наличия включений, видимых на срезе образцов в исходной руде, например кварцевые прожилки в золотосодержащих образцах руды, а также степень прозрачности образцов (рис. 2).

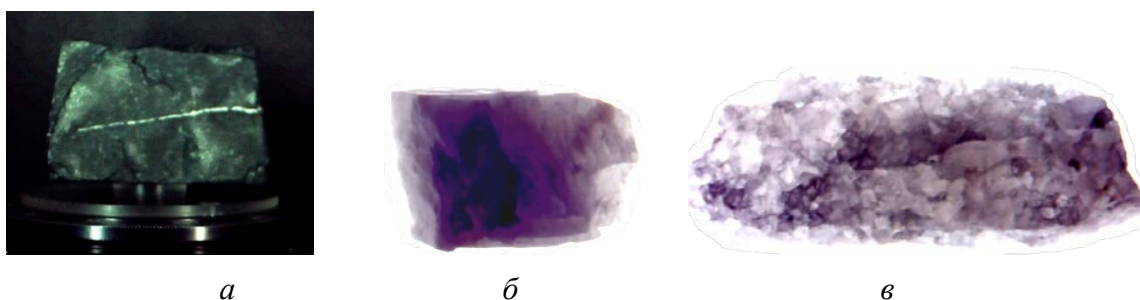


Рис. 2. Изображения образца руды, сделанные на просвет для определения степени прозрачности: а – с прожилкой кварца; б – плагиоклаза; в – кварца

На основании рассмотренных оптических свойств минеральных структур, которые могут быть использованы при углубленном анализе оптическим методом, разработана 3D-модель двухканальной адаптивной оптико-электронной системы анализа минеральных объектов (АОЭС МО). Она необходима для предварительного моделирования каждого конкретного случая анализа рудных проб, а также для поиска оптимальных параметров настройки для исследования руды конкретного вида/месторождения. Двухканальный принцип построения подразумевает двухстороннюю съемку анализируемого объекта.

Свойство ее адаптивности заключается в том, что любой элемент конструкции позиционно изменяем. Источники освещения имеют широкий диапазон изменения своего положения как относительно объекта анализа, так и каналов регистрации. Камеры могут опускаться ниже/выше относительно положения минерального образца или перемещаться дальше/ближе, что необходимо при переходе на другой класс крупности образца. Сменные объективы камер еще более расширяют диапазон анализируемых классов крупности. Устройство фиксации объекта выдвигается из рабочей зоны для легкой смены образца и способно удерживать объекты размером до 100–150 мм. При необходимости устройство фиксации может быть заменено, что даст возможность фиксировать объект любого размера вплоть до 300–400 мм. Кроме того, подобная схема построения установки позволяет анализировать прозрачные и полупрозрачные образцы благодаря использованию узлов освещения и регистрации, расположенных на противоположных кронштейнах установки. Данную конструкцию планируется располагать в светонепроницаемом корпусе во избежание возникновения погрешностей цветоанализа.

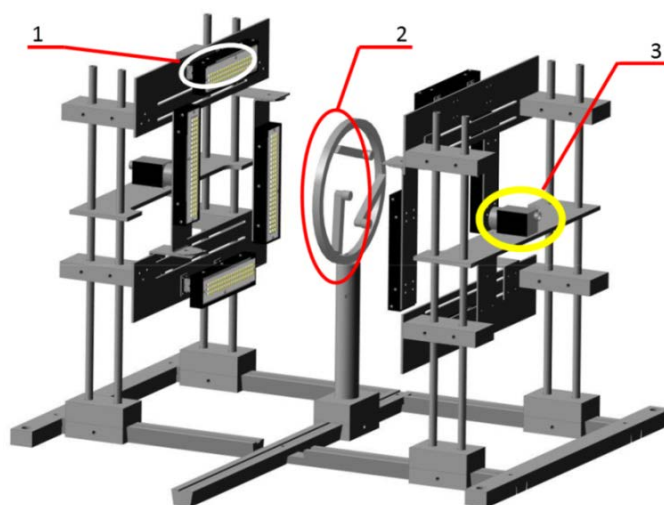
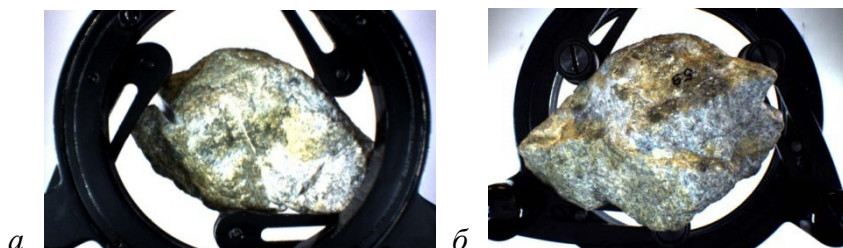


Рис. 3. 3D-модель установки лабораторной АОЭС МО: 1 – осветительная часть (состоит из восьми светодиодных источников дневного света собственной разработки) с изменяемой яркостью освещения; 2 – устройство фиксации минерального образца; 3 – цифровая камера (вторая камера расположена напротив)

В настоящий момент все детали лабораторного стенда АОЭС МО находятся на стадии изготовления. Цифровые камеры обладают малыми габаритами и высоким качеством получаемого изображения. Сменный фон позволяет работать с разными образцами руды (темные образцы лучше анализировать на светлом фоне, а светлые – на темном).

Проведены экспериментальные исследования предварительного лабораторного стенда АОЭС МО. На рис. 4 представлены снимки золотосодержащего образца, расположенного на расстоянии 25 см от объектива камеры при различной яркости освещения.



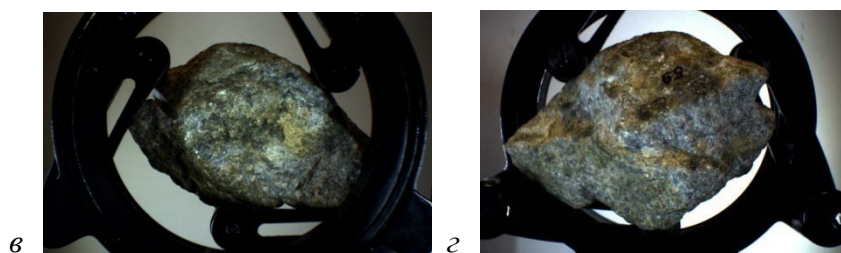


Рис. 4. Снимки образца руды: а, в – первого канала регистрации с яркостью осветителей 100 % и 50 % соответственно; б, з – второго канала регистрации с яркостью осветителей 100 % и 50 % соответственно

На рис. 5 приведены снимки золотосодержащего образца, расположенного на расстоянии 10 см от объектива камеры при различной яркости освещения (необходимо для детального анализа поверхностной структуры образца).

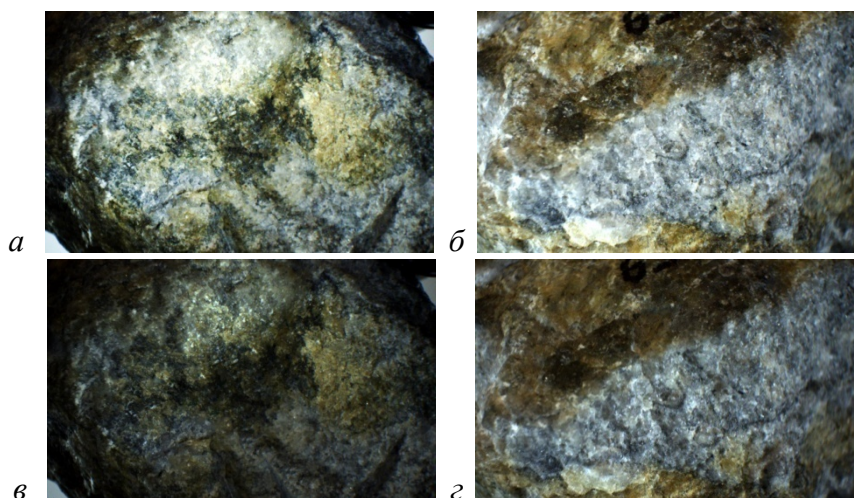


Рис. 5. Снимки образца руды: а, в – первого канала регистрации с яркостью 100 % и 50 %, соответственно; б, г – второго канала регистрации с яркостью 100 % и 50 %, соответственно

Для управления системой освещения разработан контроллер управления, а также программное обеспечение (ПО) в среде LabView (рис. 6а), которое позволяет регулировать яркость каждого источника освещения индивидуально в реальном времени. Для накопления данных с цифровых камер также разработано базовое программное обеспечение в среде LabView (рис. 6б).

Данное ПО позволяет индивидуально регулировать яркость каждого из источников (необходимо для анализа сложных объектов, а также объектов с включениями различной природы, которые могут давать блик в изображении) и получать одиночные снимки или серию кадров анализируемых объектов. В дальнейшем будет сделан упор на автоматизацию анализа минеральных образцов.

Заключение

Результаты исследований показали, что на данном стенде возможно исследовать образцы с классом крупности 10–150 мм. Наличие регулируемой системы освещения позволяет индивидуально настроить подсветку с каждого сектора рабочей зоны, для того чтобы конкретная область образца была оптимально освещена. Кроме того, это также актуально при исследовании образцов с сульфидным блеском, так как позволяет регулировать видимость камерой блика от каждого из вкраплений сульфида.

Программное обеспечение позволяет получать качественные снимки образцов, сохранять отдельные кадры или серию снимков. В дальнейшем будет сделан упор на его

отладку, а также расширение функционала для автоматизированного процесса углубленного анализа образцов минеральных руд и твердых полезных ископаемых.

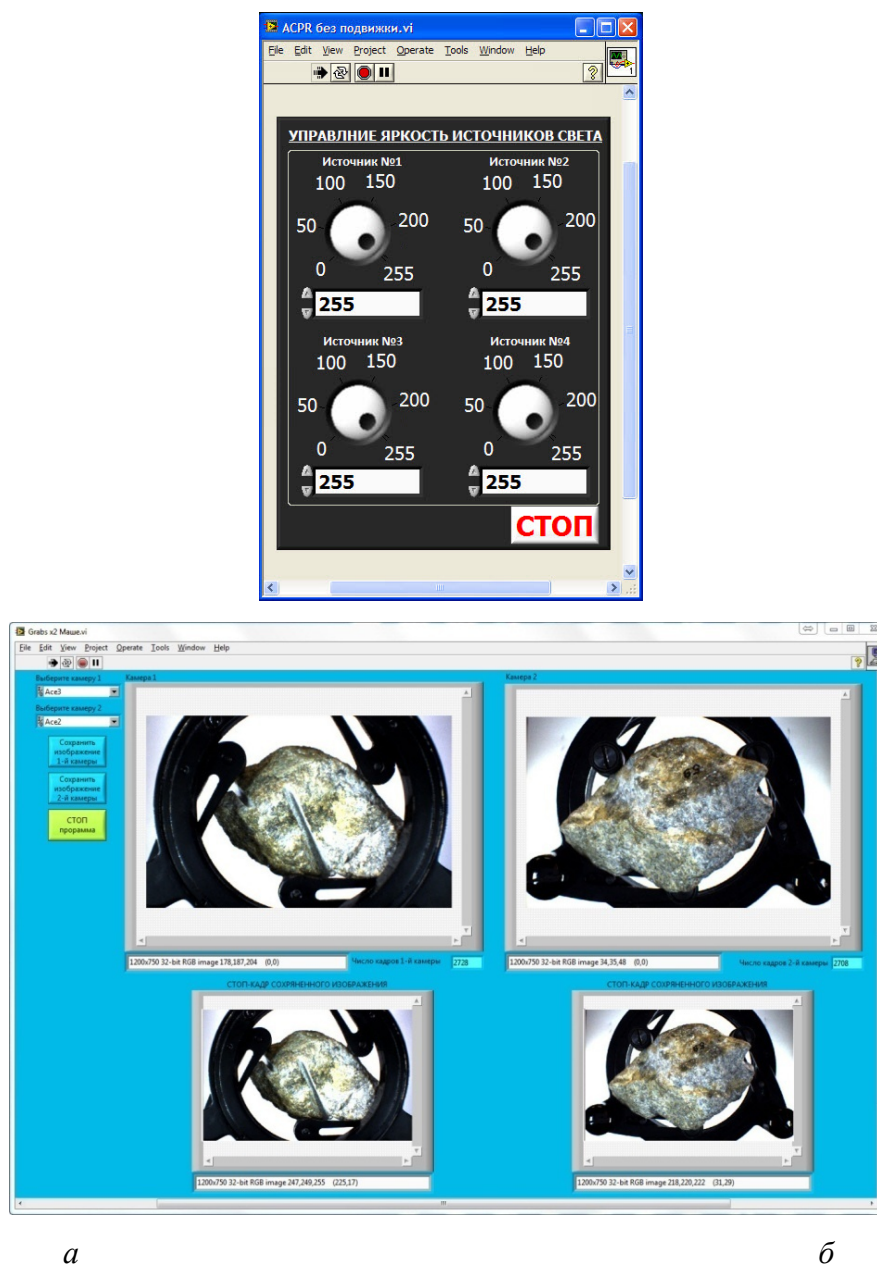


Рис. 6. Графический интерфейс программы: а – для управления яркостью источников освещения; б – для накопления данных с цифровых камер

Основная область применения результатов проекта – технологическая минералогия. Помимо этого, разработанные в рамках настоящего проекта технические решения можно использовать и при создании портативного переносного комплекса, предназначенного для работы в полевых условиях, например при настройке уже существующих оптических сепараторов.

Публикации

1. Алехин А.А., Горбунова Е.В., Петухова Д.Б., Чертов А.Н. О проблеме оценки обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Сборник статей по материалам докладов VIII Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск, 2014. С. 171–176.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

2. *Алехин А.А., Перетягин В.С.* Двухканальная оптико-электронная система цветового анализа минералов // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 7. С. 90–91.
3. *Алехин А.А.* Макет двухканального оптико-электронного комплекса для экспресс-анализа руд твердых полезных ископаемых // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 86–87.

Литература

1. *Никулин А.И., Романчук А.И., Павлова Н.Н.* [и др.] Технология переработки золотосодержащих руд месторождения Сухой Лог с предварительной крупнокусовой фотометрической сепарацией // Руды и металлы. 2009. № 2. С. 68–77.
2. *Рябкин В.К., Литвинцев Э.Г., Тихвинский А.В., Карпенко И.А., Пичугин А.Н., Кобзев А.С.* Полихромная фотометрическая сепарация золотосодержащих руд // Горный журнал. 2007. № 12. С. 88–93.
3. *Von Ketelhodt, L.* Viability of optical sorting of gold waste rock dumps // World Gold Conference 2009. 2009. P. 271–277.
4. Обзор алмазодобывающей отрасли России [Электронный ресурс] // Информационно-аналитическое агентство Advisers [Официальный сайт]. URL: <http://www.advisers.ru/file/advisers/almaz.pdf> (дата обращения: 14.05.2014).
5. GEM Series sorting equipment of Commodas Ultrasort [Electronic resource] // TOMRA Sorting Company [Official website]. URL: <http://www.tomra.com/en/solutions-and-products/sorting-solutions/mining/sorting-equipment/gem-series> (accessed: 14.05.2014).
6. *Dehler M.* Optical sorting of ceramic raw materials // Tiles and Bricks International. 2003. Vol. 19. No 4. P. 248–251.
7. *Harbeck H.* Optoelectronic separation in feldspar processing at Maffei Sarda // Aufbereitungstechnik / Mineral Processing. 2001. Vol. 42. No. 9. P. 438–444.
8. *Юстова Е.Н.* Цветовые измерения (Колориметрия). СПб., 2000. – 397 с.



Бабкина Анастасия Николаевна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптоинформационных технологий и материалов
E-mail: babkinauha@yandex.ru

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСОВ МЕДИ В НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СТЕКЛАХ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

А.Н. Бабкина

Научный руководитель – профессор Н.В. Никоноров

Цель работы – исследование обратимого изменения расположения полосы люминесценции при изменении температуры (явление люминесцентного термохромизма), наблюдающееся у неорганических стекол, имеющих в своем составе ионы одновалентной меди и молекулярные комплексы ее содержащие. Исследования проводились в области контроля спектрально-люминесцентных свойств многокомпонентных неорганических стекол с матрицей из трех и более стеклообразующих оксидов, содержащих люминесцентные центры с медью, при изменении температуры окружающей среды.

Ярко выраженный люминесцентный термохромизм может открыть принципиально новую эру в развитии люминесцентных датчиков температуры. Обычно они представляют

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

собой волоконно-оптическую схему, состоящую из источника излучения, линзы, которая фокусирует сигнал от источника на выход оптического волокна, изготовленного из чувствительного материала, помещенного в зону измерения температуры, и регистрирующего люминесценцию волоконного фотоприемника с фильтром, отсекающим паразитное излучение [1]. При использовании в датчике температуры оптического элемента, обладающего явлением люминесцентного термохромизма, можно избежать уменьшения чувствительности датчика при высоких температурах, которое наблюдается в датчиках с интегральным принципом работы. Поэтому на данный момент так важно синтезировать стеклообразный материал, который бы по своим технологическим и люминесцентным свойствам смог бы играть роль чувствительного элемента волоконного датчика температуры.

В ходе работы было синтезировано несколько неорганических стекол различных матриц: силикатной, боратной и фосфатной. Особенности синтеза данных видов стекол описаны в работе [2] Исходным составом калиево-алюмо-боратного стекла послужил следующий: K_2O (25) – Al_2O_3 (25) – B_2O_3 (55) – Cu_2O (5) – $NaCl$ (x) – SnO_2 (1) – Sb_2O_3 (1) – Na_3AlF_6 (2,5). В стекле боратной матрицы дополнительно изменяемым фактором послужило различное содержание $xNaCl$ (x = 5,1; 6,7; 8,6 мол%). Известно [3], что галогенсодержащие добавки в стекле могут влиять на валентное состояние меди: чем больше необходимой нам одновалентной меди, тем более обесцвеченным становится стекло (рис. 1).

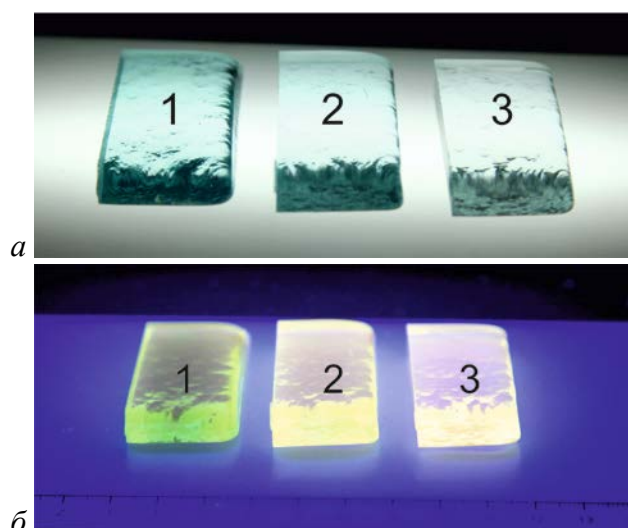


Рис. 1. Образцы боратного стекла с медью с различным содержанием $NaCl$: 1 – 5,1 %, 2 – 6,7 %, 3 – 8,6 %: а – внешний вид; б – люминесценция под действием излучения с $\lambda = 365$ нм

Проведение температурных исследований люминесцентных свойств стекол в широком диапазоне температур было осуществлено с использованием следующей экспериментальной установки (рис. 2), состоящей из ультрафиолетового светодиода 1 с длиной волны излучения 405 нм, термостата 2, температурной приставки 3 и волоконного спектрометра 4 Avaspec-2048 (фирмы Avalar).

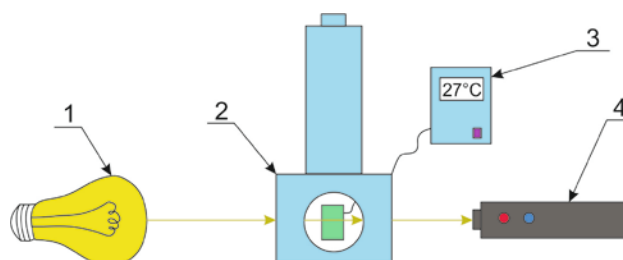


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Эксперименты, проведенные на боратных стеклах, показали, что наличие в них $NaCl$ не влияет на размер люминесцентного термохромизма (рис. 3). Этот результат был использован

и при исследовании стекол других матриц, в которых содержание галогенов уже не менялось.

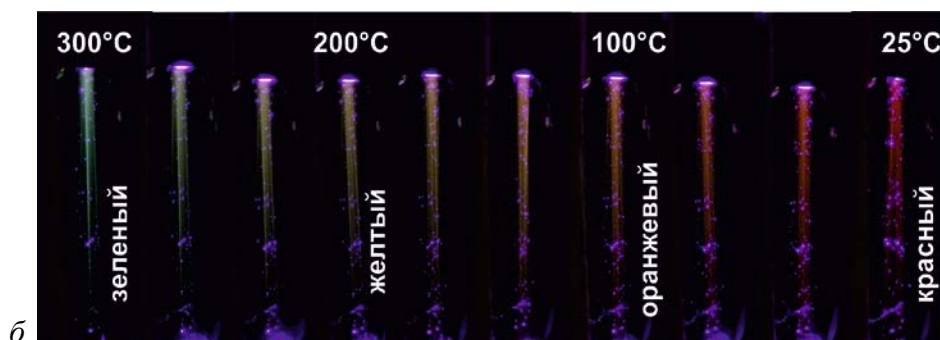
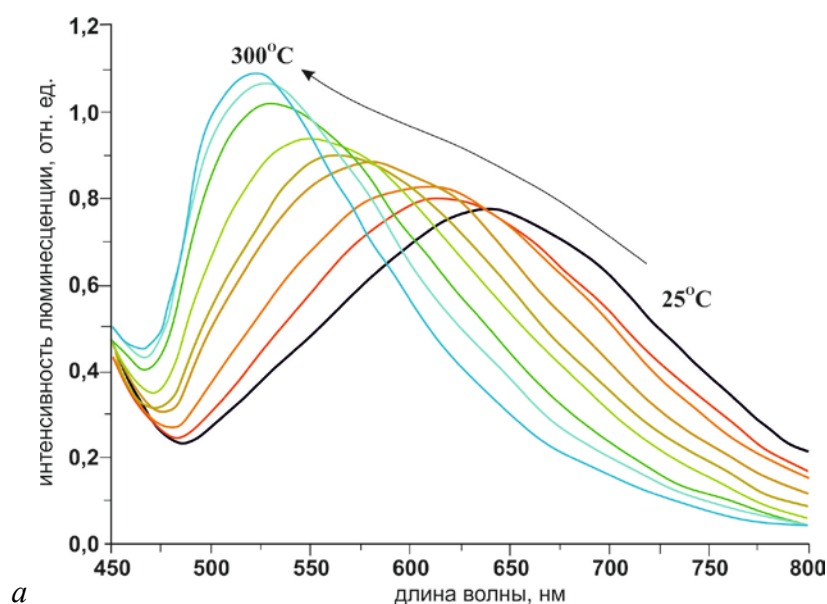


Рис. 3. Анализ боратного стекла с содержанием 6,7 % NaCl: а – изменение полосы люминесценции образца с изменением его температуры при возбуждении излучением с $\lambda = 405$ нм; б – визуальное изменение цвета люминесценции образца с изменением его температуры

Результаты аналогичных температурных исследований силикатного и фосфатного стекол приведены на рис. 4. Силикатное стекло имело следующий состав: SiO₂ (41) – B₂O₃ (39) Al₂O₃ (6) Na₂O (15) – Cu₂O (3,34) – NaCl (3,96) (мол %), фосфатное стекло – NaPO₃ (12) – Ba(PO₃)₂ (17) – AlF₃ (5,3) – CuCl (1) (вес %).

В силикатном стекле визуальное изменение цвета люминесценции при возбуждении излучением с $\lambda = 405$ нм имело тот же характер, что у боратного стекла. Спектроскопические данные показали, что смещение полосы люминесценции в силикатном стекле составляет тоже значение, что и у боратных стекол – 95 нм в диапазоне температур от 20 до 200 °С. Стекло фосфатной матрицы показало себя менее термочувствительным: при изменении температуры от 20 до 200 °С сдвиг полосы люминесценции составил всего 20 нм.

Основной областью применения результатов проекта является разработка схемы волоконно-оптического датчика температуры, работающего по принципу сдвига полосы люминесценции термочувствительного материала при изменении температуры. Основными преимуществами датчика с чувствительным элементом, изготовленным из такого люминесцентного материала, являются его простота, надежность, дешевизна и постоянная на протяжении всего рабочего интервала температур чувствительность. Неорганическое стекло как никакой другой материал подходит в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического датчика. Это связано с довольно простой процедурой изготовления из него

оптического волокна и состыковкой его с проводящим кварцевым волокном, которое обычно используется в линиях передачи информации.

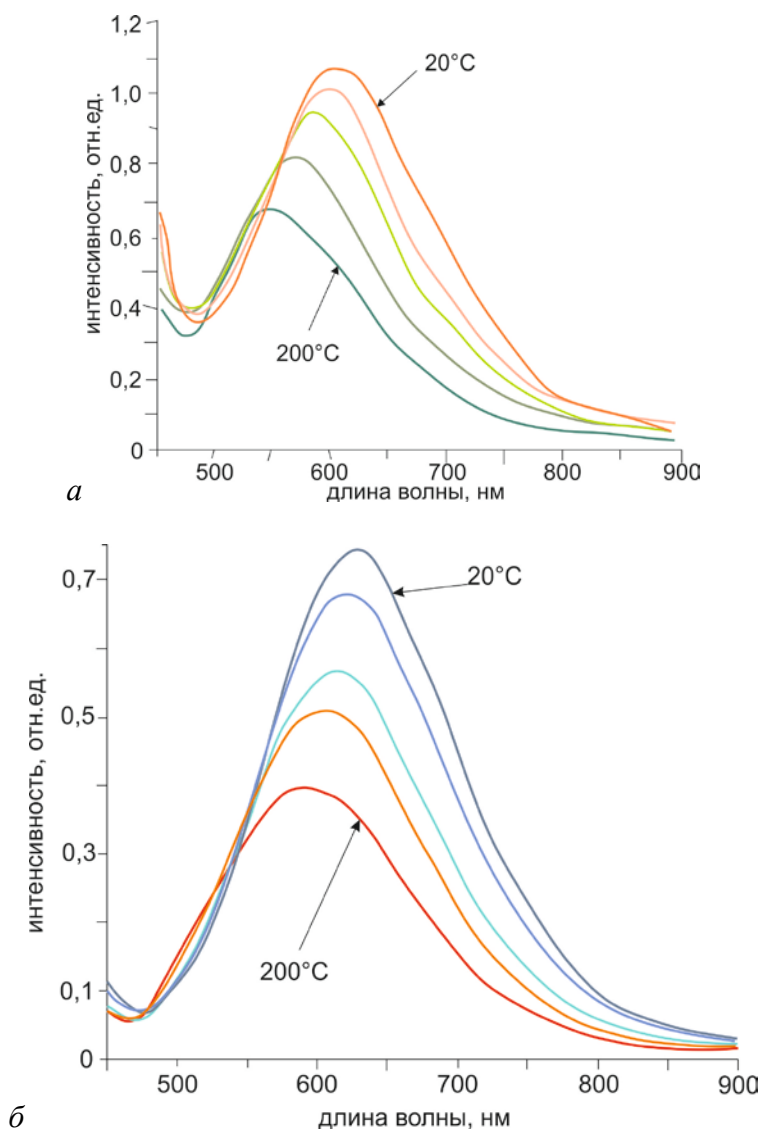


Рис. 4. Динамика изменения спектров люминесценции стекол при изменении их температуры от 20 до 200 °С: а – боросиликатное стекло; б – фосфатное стекло при возбуждении излучением с $\lambda = 405$ нм

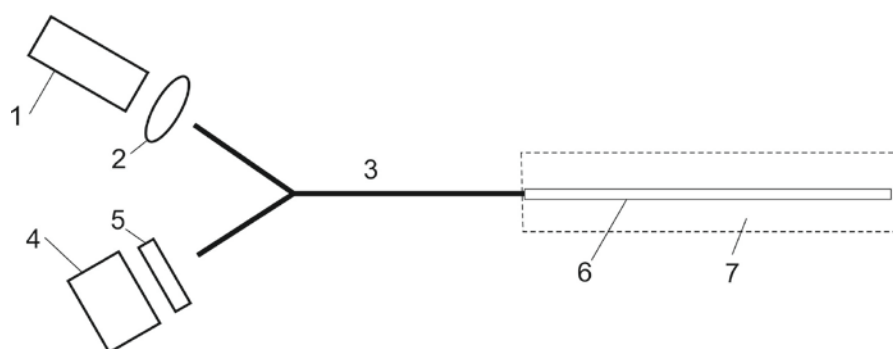


Рис. 5. Схема волоконно-оптического люминесцентного датчика температуры: 1 – источник оптического сигнала, 2 – линза, 3 – передающее оптическое волокно с волоконным разветвителем, 4 – фотоприемное устройство, 5 – оптический фильтр, 6 – чувствительный элемент датчика, 7 – объект

Разработанные неорганические стекла с боратной и силикатной матрицами являются оптическими материалами с коэффициентом поглощения в видимой области, не превышающем 1 см^{-1} . По этому параметру они прекрасно подходят для производственных волоконно-оптических датчиков температуры. На рис. 5 представлена схема волоконно-оптического люминесцентного датчика температуры с чувствительным элементом из разработанного неорганического стекла.

Заключение

В ходе проекта было обнаружено, что явление люминесцентного термохромизма присуще не только стеклам калиево-алюмо-боратной матрицы, но и стеклам боросиликатной и фторфосфатной матрицам. На расположение и форму полос люминесценции стекол влияют в основном только галогенсодержащие добавки, вводимые в состав стекла, однако на величину люминесцентного термохромизма в рамках стекол одного состава они не влияют. В связи с этим можно предположить, что изучаемый нами термохромизм относится не к галогенсодержащим молекулярным кластерам, а к кластерам $(\text{Cu}_2\text{O})_n$. Как известно [1], люминесценция молекулярных кластеров сильно зависит от их окружения, так как исследуемые нами стекла являются многокомпонентными, то вследствие изменения температуры реструктуризация их вполне вероятна. Она может происходить благодаря изменению валентного состояния бора, именно поэтому сильным люминесцентным термохромизмом обладают лишь те стекла, в которых присутствует большое содержание бора. Наибольшей температурной чувствительностью в рамках данного исследования обладают стекла силикатной и боратной матриц. При этом наибольшая интенсивность полосы люминесценции, возбуждаемой фиолетовым полупроводниковым светодиодом, достигается при наличии в составе стекла галогенсодержащих добавок в объеме не более чем 5 вес%. На данный момент именно стекла этих матриц являются наиболее перспективными для использования в волоконно-оптических люминесцентных датчиках температуры. Дальнейшие работы по внедрению неорганических стекол в датчики температуры будут проводиться именно на них.

Публикации

1. Бабкина А.Н., Никоноров Н.В., Шахвердов Т.А., Ширшнев П.С. Идентификация центров люминесценции в стеклах с ионами меди и хлора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Вып. 3 (85). С. 129–132.
2. Бабкина А.Н., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Ширшнев П.С., Шахвердов Т.А. Влияние температуры на спектры люминесценции калиево-алюмо-боратных и силикатных стекол с ионами меди (I) и серебра // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116. № 1. С. 93–100.
3. Бабкина А.Н., Сидоров А.И., Ширшнев П.С. Термохромный эффект в алюмоборатных стеклах с ионами меди (I) и хлора // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 1. С. 66–69.
4. Babkina A.N., Nikonov N.V., Shakhverdov T.A., Shirshnev P.S., Sidorov A.I. Luminescent thermochromism in potassium-alumina-borate glass with copper-containing molecular clusters at elevated temperatures // Optical Materials. 2014. Vol. 36. No. 4. P. 773–777.
5. Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Бабкина А.Н., Ширшнев П.С., Шахвердов Т.А. Люминесцентный термохромизм калиево-алюмо-боратных стекол с молекулярными кластерами $(\text{Cu}_2\text{O})_n$ // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. 2014. С. 237–238.

Литература

1. Агафонова Д.С., Егоров В.И., Игнатьев А.И., Сидоров А.И. Влияние температуры на люминесценцию молекулярных кластеров серебра в фото-термо-рефрактивных стеклах // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 8. С. 51–56.

2. Никоноров Н.В., Цехомский В.А., Ширинев П.С.. Особенности синтеза стекол с нанокристаллами хлорида меди // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. Вып. 5 (75). С. 23–26.

3. Голубков В.В., Цехомский В.А.. Роль хлористого натрия в формировании светочувствительной фазы галоидомедного фотохромного стекла // Физика и химия стекла. 1986. Т. 12. Вып. 2. С. 206–215.



Батура Владимир Александрович
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра вычислительной техники
E-mail: batu-vladimir@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭТАЛОННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОГО МАРКИРОВАНИЯ НЕПОДВИЖНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.А. Батура

Научный руководитель – профессор А.Ю. Тропченко

Цель проекта – разработка универсальной системы эталонного тестирования алгоритмов цифрового маркирования неподвижных изображений. Проект основан на анализе существующих систем эталонного тестирования и алгоритмов цифрового маркирования.

В рамках данного проекта решалось несколько задач.

1. Создание универсальной системы эталонного тестирования алгоритмов цифрового маркирования, поддерживающей алгоритмы, написанные на различных языках программирования (Matlab, C#, C++), и обладающей удобным графическим интерфейсом пользователя.

2. Увеличение скорости создания методов цифрового маркирования неподвижных изображений и как следствие снижение себестоимости их разработки.

В качестве методов исследования применялись:

- методы цифровой обработки сигналов, используемые в алгоритмах встраивания водяных знаков и оценке качества изображения;
- методы цифровой обработки изображений, используемые для реализации атак на защищенные изображения (стеганоконтейнеры);
- компьютерное моделирование, реализующее данные методы.

Как правило, при оценке качества стеганоконтейнера используют пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR), а при оценке качества извлеченного из стеганоконтейнера водяного знака – коэффициент корреляции. Однако данные показатели не всегда корректно определяют уровень внесенных искажений. Поэтому было принято решение в разработанной системе дополнительно использовать универсальный показатель качества [1], который более точно определяет уровень вносимых искажений.

При анализе устойчивости алгоритмов цифрового маркирования, как правило, используют ряд вредоносных воздействий, которые искажают стеганоконтейнер, ухудшая при этом качество извлекаемого водяного знака. Наиболее распространенными атаками

являются: компрессия JPEG и JPEG2000, зашумление и фильтрация, эквализация гистограммы, изменение размера изображения, его усечение и поворот.

Для реализации компьютерного моделирования данных методов было решено использовать математический программный комплекс Matlab, который на сегодняшний день является стандартом де-факто в области инженерных вычислений. Недостатком Matlab является отсутствие гибкой системы построения пользовательского интерфейса. Поэтому было принято решение использовать платформу Net Framework, обладающую большими возможностями для построения пользовательского интерфейса.

На основе приведенных выше методов исследования была разработана универсальная система эталонного тестирования алгоритмов цифрового маркирования неподвижных изображений. Тестированию алгоритма предшествует его компоновка в DLL-библиотеку Watermarking.dll, которую пользователь помещает в корневую папку системы тестирования.

В библиотеке обязательно присутствие двух функций: `embAlg` – алгоритма внедрения и `extrAlg` – алгоритма извлечения водяного знака. Общий вид функций представлен ниже:

```
[coverImage specialInfo]= embAlg(image, watermark, param1, param2, param3)
outputWatermark = extrAlg(coverImage, specialInfo),
```

где *image* – местоположение защищаемого изображения, *watermark* – местоположение встраиваемого водяного знака, *coverImage* – стеганоконтейнер, *outputWatermark* – извлеченный водяной знак, *specialInfo* – параметр, необходимый для извлечения водяного знака, *param* – дополнительные параметры алгоритма внедрения.

Схема системы, состоящей из набора программных модулей, представлена на рис. 1.

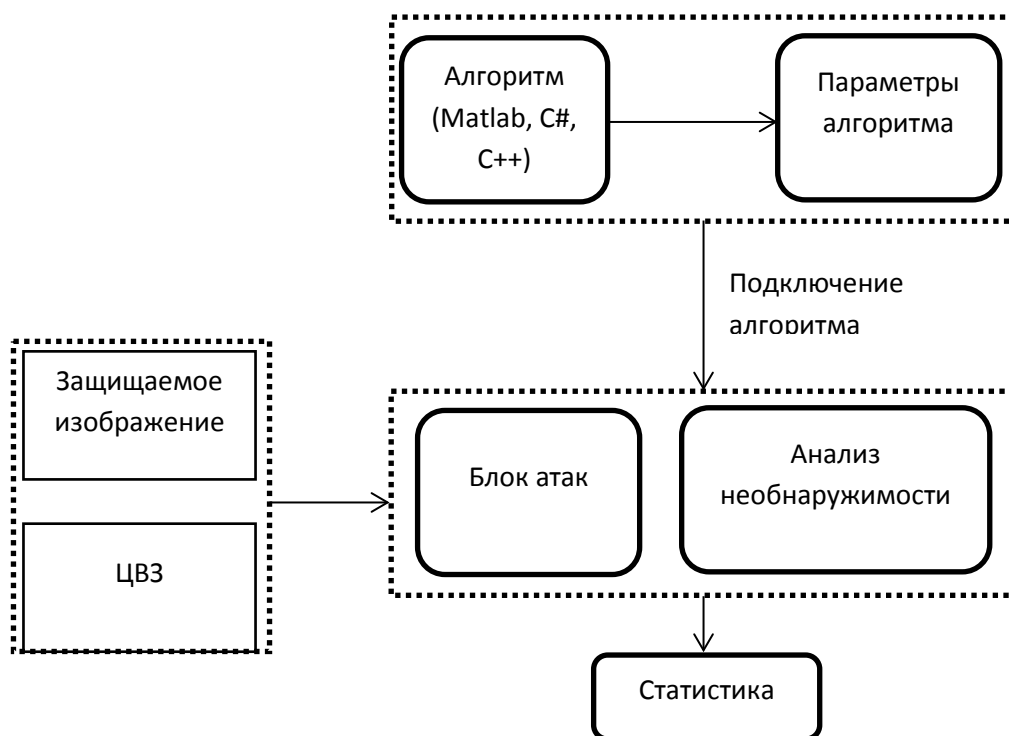


Рис. 1. Схема работы будущей системы эталонного тестирования

После подготовки алгоритма пользователю необходимо отрегулировать предварительные параметры тестирования: указать тип сборки алгоритма (Matlab, C#/C++), количество дополнительных параметров и их тип, режим проверки алгоритма, количество возвращаемых параметров функции встраивания. Для удобства пользователь может ввести названия используемых параметров, которые отобразятся в графическом интерфейсе рядом с окном редактирования их значений. Для проверки стойкости алгоритма предусмотрено несколько режимов:

- полная проверка – применяются все атаки с заданными пользователем параметрами;
- выборочная – применяются только те вредоносные воздействия, которые выбрал пользователь;
- комбинированная – вредоносные воздействия применяются не по отдельности, а последовательно одно за другим. Например, пользователь может использовать зашумление изображения, а потом удалить шум при помощи фильтров. Тем самым будет проводиться имитация реальной атаки злоумышленника на изображение.

Общий вид окна модуля параметров тестирования представлен на рис. 2.

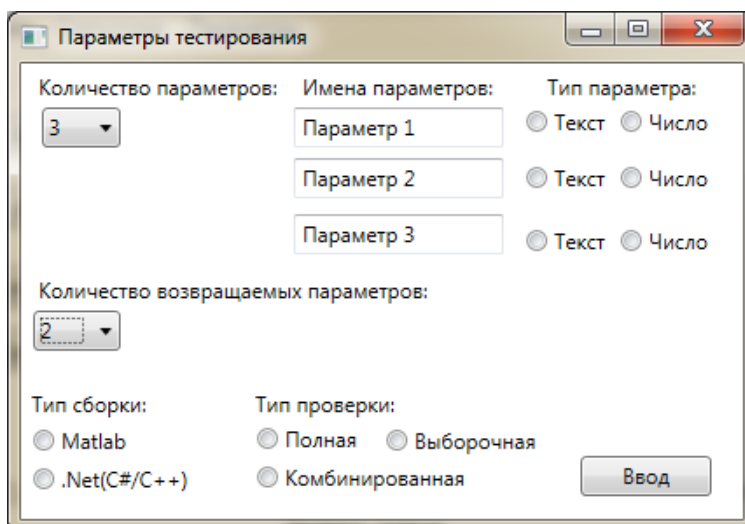


Рис. 2. Окно выбора параметров тестирования

После указания исходных параметров тестирования в главном окне программы (рис. 3) пользователь выбирает исходное изображение, водяной знак, а также определяет диапазон изменений значений характеристик вредоносных воздействий. В случае выбора одиночной атаки поврежденное изображение и показатели качества отображаются в главном окне программы. Как видно из рис. 3, в качестве вредоносного воздействия было выбрано JPEG-сжатие с коэффициентом качества равным нулю. После процедур встраивания и извлечения в соответствующих полях были выведены изображения. При нажатии на них появится отдельное окно для детального осмотра изображения.

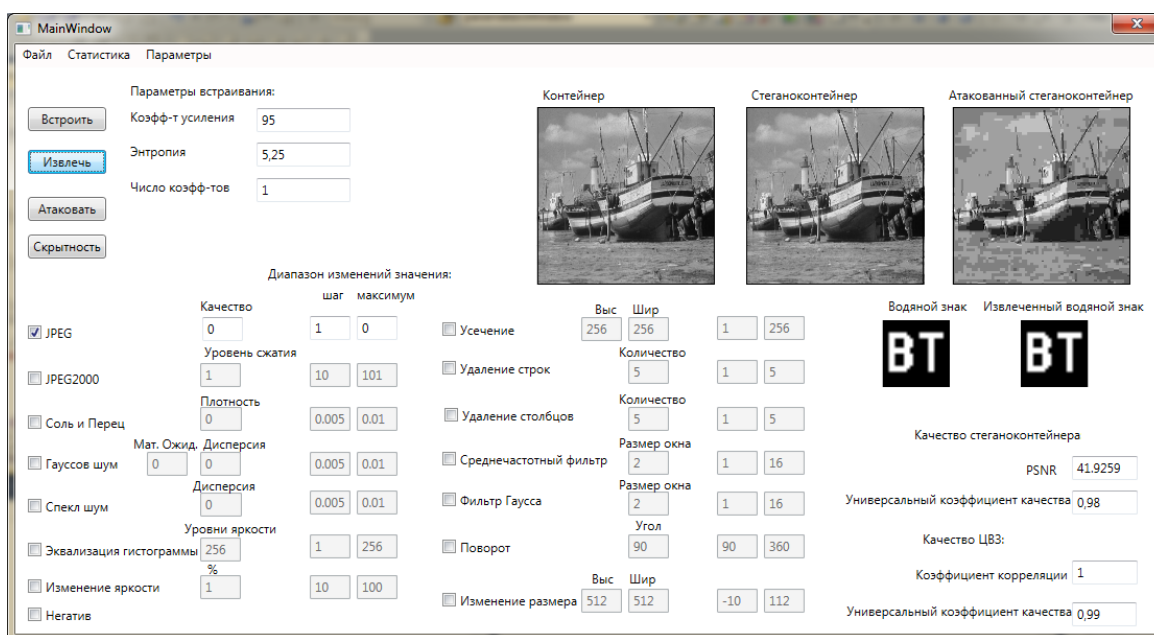


Рис. 3. Главный модуль системы

При использовании множества атак показатели качества отображаются в модуле статистики (рис. 4). Поврежденные изображения сохраняются в корневой папке системы эталонного тестирования.

При нажатии кнопки «График» осуществляется построение графика зависимости между параметром вредоносного воздействия и показателем корреляции между исходным и извлеченным водяным знаком (рис. 5).

При необходимости предусмотрена возможность анализа необнаруживаемости встроенного водяного знака методом X^2 [2] при помощи кнопки «Скрытность», расположенной в главном окне программы. Результат работы данного модуля представлен в виде графика (рис. 6).

JPEG		График																			
Кoeffициент качества	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0										
Кoeffициент корреляции	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,96	0,97										

JPEG2000		График																			
Уровень сжатия	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101										
Кoeffициент корреляции	1	1	0,9710	0,92	0,84	0,68	0,56	0,53	0,44	0,42	0,37										

Соль и перец		График																												
Плотность	0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055	0,065	0,07	0,075	0,08	0,085	0,09	0,095	0,1										
Кoeffициент корреляции	1	1	1	0,98	0,95	0,94	0,93	0,92	0,85	0,86	0,82	0,85	0,81	0,73	0,73	0,66	0,76	0,74	0,73	0,71										

Гауссов шум		График																												
Дисперсия	0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055	0,065	0,07	0,075	0,08	0,085	0,09	0,095	0,1										
Кoeffициент корреляции	1	0,8	0,69	0,61	0,55	0,51	0,47	0,44	0,44	0,43	0,41	0,36	0,36	0,36	0,33	0,32	0,31	0,29	0,30	0,29										

Спекл шум		График																												
Дисперсия	0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055	0,065	0,07	0,075	0,08	0,085	0,09	0,095	0,1										
Кoeffициент корреляции	1	1	0,99	1	0,98	0,97	0,95	0,93	0,93	0,9	0,9	0,86	0,86	0,86	0,8	0,75	0,69	0,76	0,74	0,79										

Эквализация гистограммы		График																			
-------------------------	--	--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Рис. 4. Модуль статистики

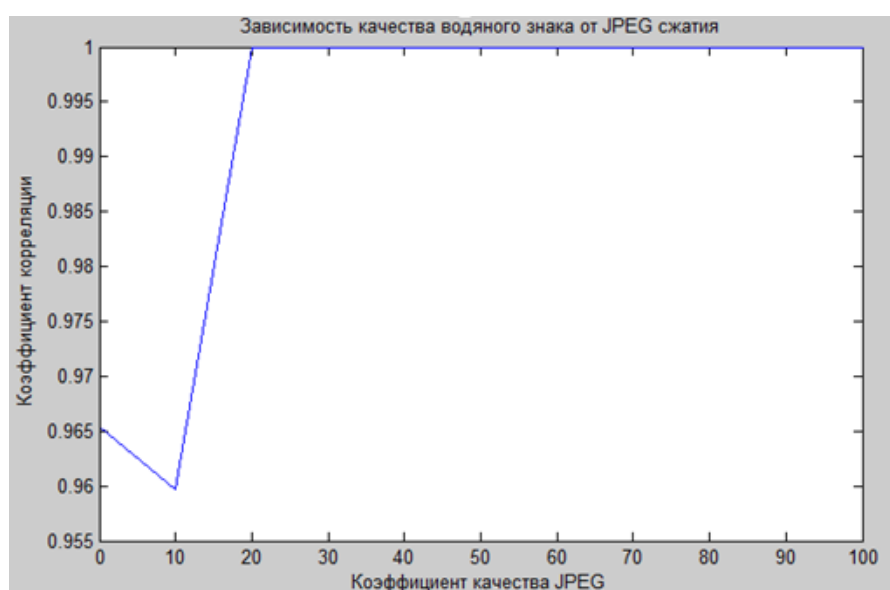


Рис. 5. Графическое представление полученных данных

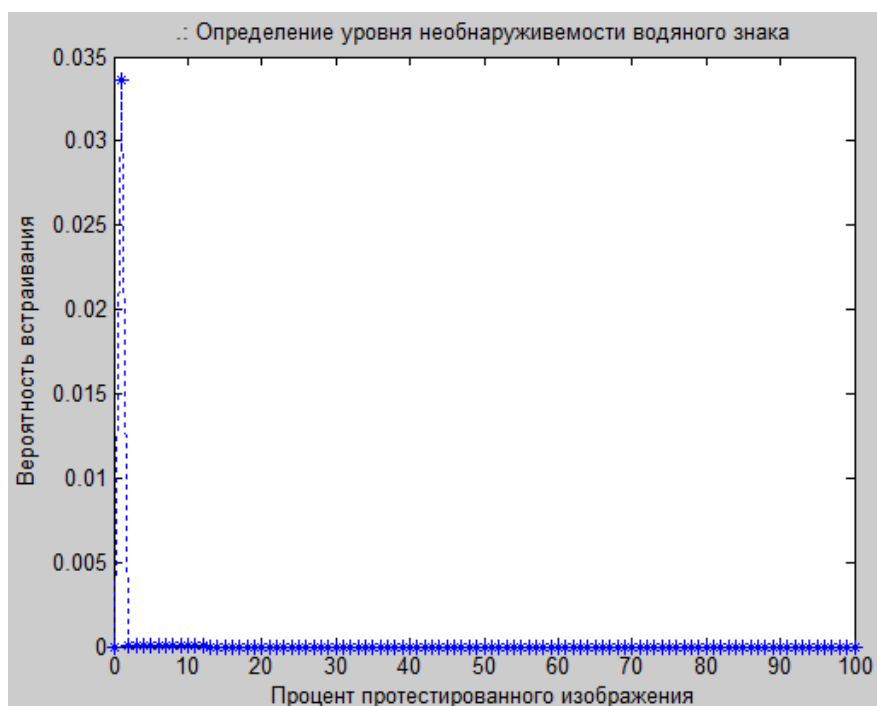


Рис. 6. Анализ необнаруживаемости водяного знака методом χ^2

Заключение

В результате реализации проекта была выполнена задача разработки универсальной системы эталонного тестирования алгоритмов цифрового маркирования неподвижных изображений. Предложенная программа по сравнению с взятой за основу РК-системой [3] обладает рядом достоинств:

- удобным графическим интерфейсом;
- гибкой настройкой параметров тестирования;
- возможностью проверки алгоритмов, написанных на разных языках программирования.

В рамках данного проекта были решены следующие задачи:

- создана универсальная система эталонного тестирования алгоритмов цифрового маркирования неподвижных изображений;
- увеличены скорости создания методов цифрового маркирования неподвижных изображений и как следствие снижена себестоимость их разработки.

Проект будет подлежать дальнейшему усовершенствованию, включая увеличение количества атак с подключением баз данных и возможность дальнейшего импорта результатов тестирования.

Результаты работы найдут применение на кафедре ВТ Университета ИТМО в учебном процессе (при проведении практических занятий и лабораторных работ по курсу «Системы обработки сигналов и изображений», а также при организации дипломного проектирования) и в научно-исследовательской работе при анализе устойчивости алгоритмов цифрового маркирования и скрытой связи, поиске их наиболее оптимальных параметров.

Публикации

1. Батура В.А., Тропченко А.Ю. Эффективность алгоритмов маркирования цифровых изображений в частотной области на основе дискретного преобразования Адамара // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 4. С. 7–11.
2. Батура В.А. Методы цифрового маркирования неподвижных изображений // Инженерный вестник. 2013. № 8. С. 583–590.

3. *Батура В.А.* Современные методы маркирования неподвижных изображений в частотной области // Сборник трудов II Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2013. С. 18–23.

Литература

1. *Zhou Wang, Bovik A.C.* A universal image quality index // IEEE Signal Processing Letters. 2002. Vol. 9. No 3. P. 81–84.
2. *Christy A. Stanley* Pairs of Values and the Chi-squared Attack. Iowa State University, 2005. – 45 p.
3. *Rajwant Kaur* Developing a benchmark model for image digital watermarking // International Journal of Applied Information Systems. New York, 2012. Vol. 3. No.5. P. 30–34.



Булгакова Елена Владимировна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра речевых информационных систем
E-mail: el.bulgakova2013@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИКТОРОВ ПО ГОЛОСУ

Е.В. Булгакова

Научный руководитель – профессор Ю.Н. Матвеев

Цель работы состоит в создании и реализации полуавтоматической системы идентификации дикторов по голосу в случаях проведения фоноскопических исследований в условиях временных ограничений.

Задача идентификации дикторов заключается в установлении тождества личности по совокупности общих и частных признаков его голоса и речи.

В процессе проведения фоноскопических исследований с целью идентификации говорящего применяются различные экспертные методы (акустические, лингвистические и аудитивные), которые обладают значительной трудоемкостью. Надежность результатов комплексного анализа фонограмм с использованием этих методов зависит от уровня квалификации эксперта.

В зависимости от условий проведения фоноскопических исследований указанная задача может быть разделена на два типа. В случае проведения типовой криминалистической экспертизы при максимально детальном исследовании как образцов речи, так и спорных фонограмм (с последующим сопоставлением и интерпретацией результатов) задача идентификации дикторов по голосу и речи упрощается, но может занимать от 4-5 ч до нескольких дней. Однако на практике эксперт иногда сталкивается с ситуациями необходимости проведения фоноскопической экспертизы в условиях жестких временных ограничений, например за 1-2 ч. При этом надежность экспертизы должна быть не хуже той, которая обеспечивается типовой экспертизой.

В ходе работы был создан алгоритм расчета сходства голосов двух дикторов для языконезависимого метода мелодического контура; отобраны идентификационно важные аудитивно-лингвистические признаки, характерные для русского языка; составлено правило принятия решения для проведения аудитивно-лингвистического анализа фонограмм по

идентификационно важным признакам; для обозначенных методов проведены численные эксперименты, позволяющие оценить их уровень ошибки.

Метод мелодического контура [1] позволяет эксперту анализировать и сравнивать основные характеристики мелодических структур, представленные в виде наборов значений параметров основного тона для сопоставимых участков мелодического контура – опорных фрагментов.

Возможность сравнения мелодического оформления различных фрагментов речевого сигнала обеспечивается их относительной реализационной стабильностью в сопоставимых контекстах, то есть типичностью и повторяемостью в речи конкретного диктора с поправкой на характерную для него специфику контекстной и иной внутрдикторской вариативности.

Основная цель структурно-мелодического анализа состоит в выявлении однотипных мелодических структур в исследуемых фонограммах и сравнении их характеристик.

Подбор опорных фрагментов мелодического контура, необходимых для сравнения, осуществляется экспертом на основе слухового и визуального анализа речевого сигнала. Это могут быть фоноабзацы (последовательности из нескольких высказываний или синтагм общей длительностью более 10 с), синтагмы, а также их структурные составляющие (предшкалы, шкалы, ядерные слоги, ядерно-заядерные участки с однотипным мелодическим оформлением).

Разработанный алгоритм расчета сходства голосов двух дикторов для метода сравнения мелодического контура состоит из нескольких этапов.

1. Осуществление поиска фрагментов одного типа/подтипа на двух фонограммах.
2. Проверка достаточности числа фрагментов (не менее заданного числа; по умолчанию – пять) нужного типа/подтипа для каждой из фонограмм.
3. Проверка использования типа/подтипа и параметра для пороговых значений.
4. Расчет процента сходства/различия.
5. Считывание весовых коэффициентов в зависимости от факта сходства или различия, а также проверка использования типа/подтипа и параметра для весовых коэффициентов.
6. Расчет значений «Против» и «За» по всем параметрам одного варианта типа/подтипа.
7. Считывание весового коэффициента и проверка использования типа/подтипа для весового коэффициента.
8. Расчет единого для источника значения «против» и «за».
9. Расчет степени сходства/различия дикторов в зависимости от достаточного числа длительных фрагментов.
10. Определение значений FR/FA по степени сходства/различия и качественный вывод о сходстве/различии голосов дикторов.

Отбор идентификационно важных аудитивно-лингвистических признаков был осуществлен на основе метода опорных векторов (англ. SVM, support vector machine) [2]. Разработанный алгоритм отбора состоит из следующих этапов:

1. Преобразование всех признаков в бинарные признаки. Все признаки могут принимать значение 0 или 1.
2. Исключение из анализа признаков, у которых не было ни одного значения 1 на всех фонограммах.
3. Исключение признаков, коррелируемых с коэффициентами -1 или 1, то есть признаков, которые имеют одинаковые значения или противоположные для всех записей.

Алгоритм поиска коррелируемых признаков:

1. Преобразование значения признаков из 0-> -1.
2. Создание матрицы признаков: по одной оси – признаки, по другой – фонограммы.
3. Создание матрицы корреляции признаков из матрицы признаков.
4. Нахождение индексов по столбцу и ряду в верхней диагонали матрицы, где есть значения 1 и -1. Эти индексы (по ряду и столбцу) определяют одинаковые или противоположные признаки.

5. Составление двух наборов вектора схожести фонограмм (размер вектора – количество признаков) из бинарных признаков. Один набор получаем, когда на обеих фонограммах звучит голос одного и того же диктора (набор «свой-свой»), другой – когда на двух фонограммах звучат голоса разных дикторов (набор «свой-чужой»). Получившиеся наборы векторов состоят из 0 и 1, где 0 – это совпадение значений бинарного признака на разных фонограммах и 1 – несовпадение.

6. Построение гиперплоскости с помощью метода опорных векторов (SVM). Набор «свой-свой» отмечается как 1, а «свой-чужой» как - 1.

7. Выбор из полученной гиперплоскости коэффициентов оси с неотрицательными значениями. Удаление этих признаков с последующим переходом к построению гиперплоскости. Оставшийся набор признаков состоит из признаков, важных для идентификации диктора.

Таким образом был получен набор идентификационно важных аудитивно-лингвистических признаков для русского языка.

На основании результатов экспериментов, проведенных в группе опытных исследователей-экспертов, получены значения FR (ошибка ложного отклонения диктора) и FA (ошибка ложного принятия диктора). Данные об ошибках FR и FA представлены в Табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментов, проведенных в группе экспертов

Количество несовпавших признаков	FR (ошибка ложного отклонения диктора), %	FA (ошибка ложного принятия диктора), %
0	100	0
1	98,16	0,01
2	96,63	0,09
3	94,48	0,32
4	88,96	0,85
5	82,21	2,21
6	73,31	4,73
9	38,04	22,58
10	26,69	32,07
11	17,18	43,40
12	11,96	55,59
13	6,44	68,22
14	3,68	79,94
15	1,53	89,59
16	0	95,65
17	0	98,62
18	0	99,71
19	0	99,96
20	0	100

Как видно из результатов, представленных в Табл. 1, в случае наличия менее десяти несовпавших признаков значение FR превышает значение FA, что свидетельствует о совпадении голосов дикторов на фонограммах, представленных для анализа. В условиях наличия десяти и более несовпавших признаков значение FA превышает значение FR, что говорит о несовпадении голосов дикторов.

На основании полученных результатов было выработано следующее правило принятия решения:

1. Если количество несовпавших признаков больше либо равно десяти, то принимается решение о различии голосов дикторов на представленных фонограммах.

2. Если количество несовпавших признаков меньше десяти, то принимается решение о сходстве голосов дикторов.

Для тестирования разработанной полуавтоматической системы идентификации дикторов по голосу на основе звуковых баз данных REGION [3], RUASTEN [4], RUSTEN [5], принадлежащих ООО «ЦРТ», сформировано несколько тестовых баз, соответствующих различным сценариям, которые включают в себя присутствие на фонограмме русскоязычной и иноязычной речи. Описание выбранных тестовых баз можно найти в Табл. 2.

Таблица 2

Описание тестовых баз

Название тестовой базы	Тип материала, русскоязычный/иноязычный	Тип канала, тел./микроф.	Кол-во файлов	Средняя продолжительность записи, с
REGION	Иноязычный	телефон	83	350
RUASTEN	Русский	микрофон	17	150
RUSTEN	Русский	телефон	100	300

Таким образом, составленные базы данных имеют различные каналы связи и различные значения ОСШ (отношение сигнал/шум), а также содержат записи дикторов обоих полов, разговаривающих на различных языках народов Российской Федерации (русском, осетинском, коми, тувинском, ингушском, кабардинском, балкарском, калмыцком, аварском, лезгинском, даргинском, табасаранском, лакском). Следовательно, они подходят для оценки эффективности разработанной системы.

Для оценки производительности методов идентификации использовался показатель равновероятной ошибки – Equal Error Rate (EER, %). Для его вычисления отдельно для каждого пола было сформировано два типа сравнений: «свой-свой» и «свой-чужой».

Результаты тестирования разработанной системы, включающей аудитивно-лингвистический метод и метод мелодического контура, представлены в Табл. 3.

Таблица 3

Результаты тестирования полуавтоматической системы идентификации дикторов по голосу

Методы	Equal Error Rate, %		
	REGION	RUASTEN	RUSTEN
Метод мелодического контура	5,85	4,59	3,72
Аудитивно-лингвистический метод		3,46	2,52

Заключение

Как видно из Табл. 3, предложенная нами система, включающая методы мелодического контура и аудитивно-лингвистического анализа, показывает уровень надежности не ниже 95 % на русскоязычном материале и 94 % на иноязычном. Следует отметить, что результат сравнений фонограмм аудитивно-лингвистическим методом на звуковой базе данных REGION, содержащей иноязычный материал, не был получен в связи с тем, что аудитивно-лингвистические идентификационно важные признаки были разработаны для анализа русской речи. В этом случае результат работы системы идентификации дикторов по голосу совпадает с результатами работы языконезависимого метода мелодического контура.

Низкое значение величины Equal Error Rate для тестовой базы RUSTEN свидетельствует о том, что разработанная полуавтоматическая система идентификации дикторов по голосу применима в условиях временных ограничений для решения задачи идентификации на русскоязычном и иноязычном материале. Данное замечание является важной характеристикой системы, поскольку значительная часть фонограмм, представляемых для идентификационных исследований, содержит речь на иностранных

языках. Таким образом, эта реализация может быть применена для проведения фоновых исследований в условиях ограничения по времени как на русскоязычном, так и на иноязычном материале.

Публикации

1. Булгакова Е.В., Краснова Е.В. Экспертные системы и методы идентификации диктора [Электронный ресурс] // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 2. С. 58–63. URL: http://pribor.ifmo.ru/ru/article/8655/ekspertnye_sistemy_i_metody_identifikacii_diktora.htm (дата обращения: 29.01.2015).
2. Beziakina D., Bulgakova E. A cross-gender statistical analysis of Tuvinian intonation features in comparison with Uzbek and Azerbaijani [Electronic resource] // International Journal of Computer, Information, Science and Engineering. 2014. Vol. 8. No 5. P. 686-688. URL: <http://waset.org/publications/9998191> (accessed: 29.01.2015).

Литература

1. Смирнова Н.С. Идентификация дикторов на основе сравнения параметров ре-ализации мелодических контуров высказываний [Электронный ресурс] // Материалы международной конференции «Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии “Диалог 2007”» [Офиц. сайт]. URL: <http://www.dialog-21.ru/digests/dialog2007/materials/html/77.htm> (дата обращения: 29.01.2015).
2. Bartlett P, Shawe-Taylor J. Generalization performance of support vector machines and other pattern classifiers // Advances in Kernel Methods: Support Vector Learning. MIT Press, 1999. P. 43–54.
3. Свидетельство 2014621133 «Речевая акустическая база данных для изучения региональных особенностей русского языка с учетом условий записи и канала связи «Регион» («Region»)), опубл. 13.08.2014.
4. Свидетельство 2010620533 «Речевая акустическая база данных для идентификации говорящего по голосу "RUASTEN" (RUSSian through room Acoustic and Switched TELEphone Network»)), опубл. 20.09.2010.
5. Свидетельство 2001620120 «Речевая телефонная база данных для верификации и идентификации говорящего по голосу "RUSTEN" (RUSSian through Switched TELEphone Network»)), опубл. 30.08.2001.



Быковская Елена Александровна
Факультет естественнонаучный
Кафедра экологического приборостроения и мониторинга
E-mail: brownies@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ, ДЕПОНИРУЕМЫХ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Е.А. Быковская

Научный руководитель – доцент М.А. Кустикова

Одной из проблем Санкт-Петербурга является загрязнение его водных объектов тяжелыми металлами. Прежде всего интерес представляют те из них, которые в наибольшей

степени используются в производственной деятельности. В результате накопления во внешней среде они становятся причиной возникновения серьезной опасности с точки зрения их биологической активности и токсических свойств.

Особую опасность представляют тяжелые металлы, накопившиеся в донных отложениях (ДО), не только из-за их высокой токсичности, но и из-за их стабильности в водной среде. Попав в экосистему, тяжелые металлы совершают круговорот, мигрируя по различным ее звеньям (фитопланктон – рыба – человек), вызывая различные мутации и гибель организмов [1].

Цель работы – изучение особенностей распределения и форм нахождения тяжелых металлов, а также выбор метода получения количественных данных для сравнительной характеристики и оценки степени загрязнения ими различных компонентов экосистем.

В задачи проекта входят:

- количественная оценка антропогенных и природных факторов, определяющих источники поступления тяжелых металлов в речную сеть;
- изучение влияния морфометрических характеристик водных объектов, гидрологических, гидробиологических и физико-химических показателей на межфазовое распределение веществ в системе вода – донные отложения;
- метрологическое обеспечение контроля содержания токсичных металлов в природных и сточных водах.

Одними из самых токсичных металлов, попадающих в окружающую среду, являются мышьяк (*As*) и сурьма (*Sb*). При повышенных концентрациях они могут вызывать серьезные кишечные отравления, а по своим отдаленным последствиям опасны для человека, употребляющего в пищу водные организмы (рыб, моллюсков, водоросли и другие). При этом токсичность этих элементов зависит от их степени окисления и вида соединения. Например, соединения, содержащие *Sb* (III) намного более токсичны, чем те, которые содержат *Sb* (V). Одной из основных задач экологического мониторинга является выяснение причин загрязнения: наличие природных компонентов или влияние антропогенной деятельности человека.

Необходимо проводить постоянные исследования форм нахождения тяжелых металлов в абиотических компонентах экосистемы (из-за различной токсичности их соединений), мониторинг донных отложений (ДО) (особенно в промышленных зонах города) и очистку от них наиболее загрязненных рек и каналов Санкт-Петербурга, учитывая многолетние влияния промышленных предприятий и постоянный водооборот.

Особую актуальность данные исследования приобретают после выхода разработанных Минприроды России поправок к закону «Об охране окружающей среды», призванного к 2020 г. перевести экологическое нормирование промышленности на принцип наилучших доступных технологий. Отслеживание состояния ДО даст возможность контролировать динамику улучшения состояния окружающей среды за счет программы повышения экологической эффективности промышленных предприятий.

В ходе выполнения работы были проанализированы два метода определения тяжелых металлов в абиотических компонентах экосистемы: фотометрический и метод атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией (ААС с ЭТ) [2, 3]. При сравнении существующих методик измерений (МИ) (Табл. 1) для определения *As* и *Sb* в водных растворах оказалось, что при использовании метода фотометрии предел обнаружения *As* и *Sb* находится на границе их предельно допустимых концентраций (ПДК(*As*) – 0,05 мг/дм³, ПДК(*Sb*) – 0,05 мг/дм³). Однако этого явно недостаточно для качественного экологического мониторинга. Наблюдается также наличие большой погрешности при определении низких концентраций исследуемых элементов как одним, так и другим методом.

Необходимо разрабатывать новую МИ для определения токсичных металлов в водных растворах, которая позволит:

– достичь большей точности при определении *As* и *Sb* на низких уровнях и повысить метрологические характеристики при определении низких концентраций исследуемых элементов;

– количественно определять различные формы или фазы, в которых данные элементы (*As* и *Sb*) присутствуют в водной среде.

Таблица 1

Нормативная документация (МИ) на методы определения *As* и *Sb* в воде

Параметры сравнения	Фотометрия	ААС с ЭТ
Методика	ПНД Ф 14.1:2.49-96	ПНД Ф 14.1:2.4.140-98
Разработчик	ФГУ «Федеральный научно-методический центр анализа и мониторинга окружающей среды МПР России – ФГУ «ФЦАМ»	Аналитический Центр контроля качества воды ЗАО «РОСА» (Москва)
Диапазон измеряемых концентраций, мг/дм ³	от 0,05 до 0,8	от 0,0005 до 5
Показатель точности ±δ, %	0,05–0,25 мг/дм ³ – 41 % 0,25–0,8 мг/дм ³ – 28 %	0,0005–0,0025 мг/дм ³ – 60 % 0,05–0,3 мг/дм ³ – 15 % 0,3–5 мг/дм ³ – 10 %
Показатель повторяемости σ _г , %	0,05–0,25 мг/дм ³ – 12 % 0,25–0,8 мг/дм ³ – 8 %	0,0005–0,0025 мг/дм ³ – 20 % 0,05–0,3 мг/дм ³ – 5 % 0,3–5 мг/дм ³ – 3 %
Показатель воспроизводимости, %	0,05–0,25 мг/дм ³ – 16 % 0,25–0,8 мг/дм ³ – 11 %	0,0005–0,0025 мг/дм ³ – 28 % 0,05–0,3 мг/дм ³ – 7 % 0,3–5 мг/дм ³ – 5 %

В результате исследований был выбран метод атомно-эмиссионной спектроскопии с термическими источниками возбуждения атомов (плазмой) (АЭС-ИСП) как высокочувствительный, многоэлементный, производительный, гибкий метод анализа, позволяющий получать воспроизводимые результаты с малой абсолютной погрешностью при определении как микро- так и макроконцентраций элементов в самых разных по составу объектах. Основными критериями его выбора являются:

– многоэлементность (высокотемпературный источник возбуждения электронов в атомах позволяет порождать одновременно большое число энергетических уровней для всех выбранных элементов и совместно измерять эмиссию нескольких различных элементов);

- высокая чувствительность и низкие пределы обнаружения;
- линейность градуировочных графиков;
- низкий уровень матричных влияний;
- небольшие количества пробы, необходимые для анализа содержания металлов.

Анализ содержания загрязняющих веществ в ДО проводится в основном только перед проведением дноуглубительных работ. Однако необходимо контролировать внутригодовую и многолетнюю динамику их состояния для составления плана мероприятий по проведению дноочистительных работ.

Большинство данных о ДО содержат информацию только об их объемном содержании в водоемах. Причем мониторинг состояния большинства водоемов города не проводится, за исключением систематических научно-исследовательских работ, выполняемых различными институтами [4, 5]. Многие методики, существующие для обнаружения тяжелых металлов в ДО, обладают большой погрешностью при определении низких концентраций исследуемых элементов. Однако для качественного экологического мониторинга требуются

более низкие пределы обнаружения, которые дадут возможность получить фоновые концентрации искомых элементов.

Поэтому для определения качественного и количественного содержания тяжелых металлов в исследуемых объектах будет использована методика измерений на основе метода АЭС-ИСП с генерацией гидридов. Она позволит не только проводить постоянный мониторинг ДО водного бассейна Санкт-Петербурга по контролю содержания в них тяжелых металлов, но и получать надежные данные, позволяющие определять содержание тяжелых металлов на уровне фоновых концентраций, а также информацию о формах нахождения тяжелых металлов в абиотических компонентах экосистемы.

В качестве рабочего средства измерения выбран многоканальный автоматизированный атомно-эмиссионный спектрометр «ЭРИДАН 500» с источником возбуждения спектров индуктивно связанной плазмой (ИСП). Он предназначен для количественного эмиссионного спектрального анализа любых сложных веществ, предварительно переведенных в раствор или взвесь [6]. При внедрении в практику совместного применения метода генерации гидридов и АЭС-ИСП был использован генератор гидридов NGX-200 фирмы СЕТАС.

Методика измерений разработана в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.563-2009 «Методики (методы) измерений». Она предназначена для определения массовой доли мышьяка и сурьмы в пробах (образцах) донных отложений при содержании их от 0,05 до 100 мг/кг. Пробы, анализируемые по настоящей методике, отбираются и подготавливаются в соответствии с нормативными документами, распространяющимися на ДО ГОСТ 17.1.5.01, ГОСТ 5180 и другие. Диапазон измерений массовой доли *As* и *Sb* составляет от 0,05 до 100 мг/кг. Погрешность измерений ± 25 %.

Немаловажным является получение достоверных результатов измерительной деятельности, а также особенно актуальный в данном контексте вопрос доверия к используемым результатам. В связи с этим в работе предложено метрологическое обеспечение контроля содержания токсичных металлов в природных и сточных водах.

Одним из нормативных документов, определяющих систему метрологического обеспечения (МО) в рамках проведения измерений содержания токсичных металлов в жидких веществах и материалах является Рекомендация МИ 3238-2009 «Государственная поверочная схема для средств измерений (аналитических приборов) содержания компонентов в жидких и твердых веществах и материалах» (Рекомендация). Она распространяется на обобщенную государственную поверочную схему для средств измерений (СИ) (аналитических приборов) содержания компонентов в жидких и твердых веществах и материалах (рис. 1) и устанавливает состав и структуру комплекса государственных первичных эталонов (ГПЭ) единиц величин, характеризующих их химический состав, а также порядок передачи размеров единиц: массовой (молярной) доли компонента, %; массовой (молярной) концентрации компонента, г/дм³ (моль/дм³) от комплекса ГПЭ с помощью рабочих эталонов рабочим СИ (аналитическим приборам).

Комплекс ГПЭ применяют для передачи размера единиц массовой (молярной) доли компонента и его массовой (молярной) концентрации государственным вторичным эталонам (ГВЭ) единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах; рабочим эталонам; рабочим СИ (аналитическим приборам) содержания компонентов в жидких и твердых веществах и материалах методом сличения при помощи компаратора и метода прямых измерений.

В качестве ГВЭ используют:

- высокоточные аналитические установки для определения массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах в комплекте с методиками измерений;
- стандартные образцы состава жидких и твердых веществ и материалов.

В качестве рабочих СИ используют аналитические приборы, измеряющие содержание компонентов в жидких и твердых веществах и материалах: титраторы; анализаторы атомно-абсорбционные, оптико-эмиссионные, рентгенофлуоресцентные, спектрографические; масс-

спектрометры с индуктивно-связанной плазмой, времяпролетные с газоразрядной ионизацией, изотопные; хроматографы газовые, жидкостные, хромато-масс-спектрометры и т. д. в комплекте с МИ.

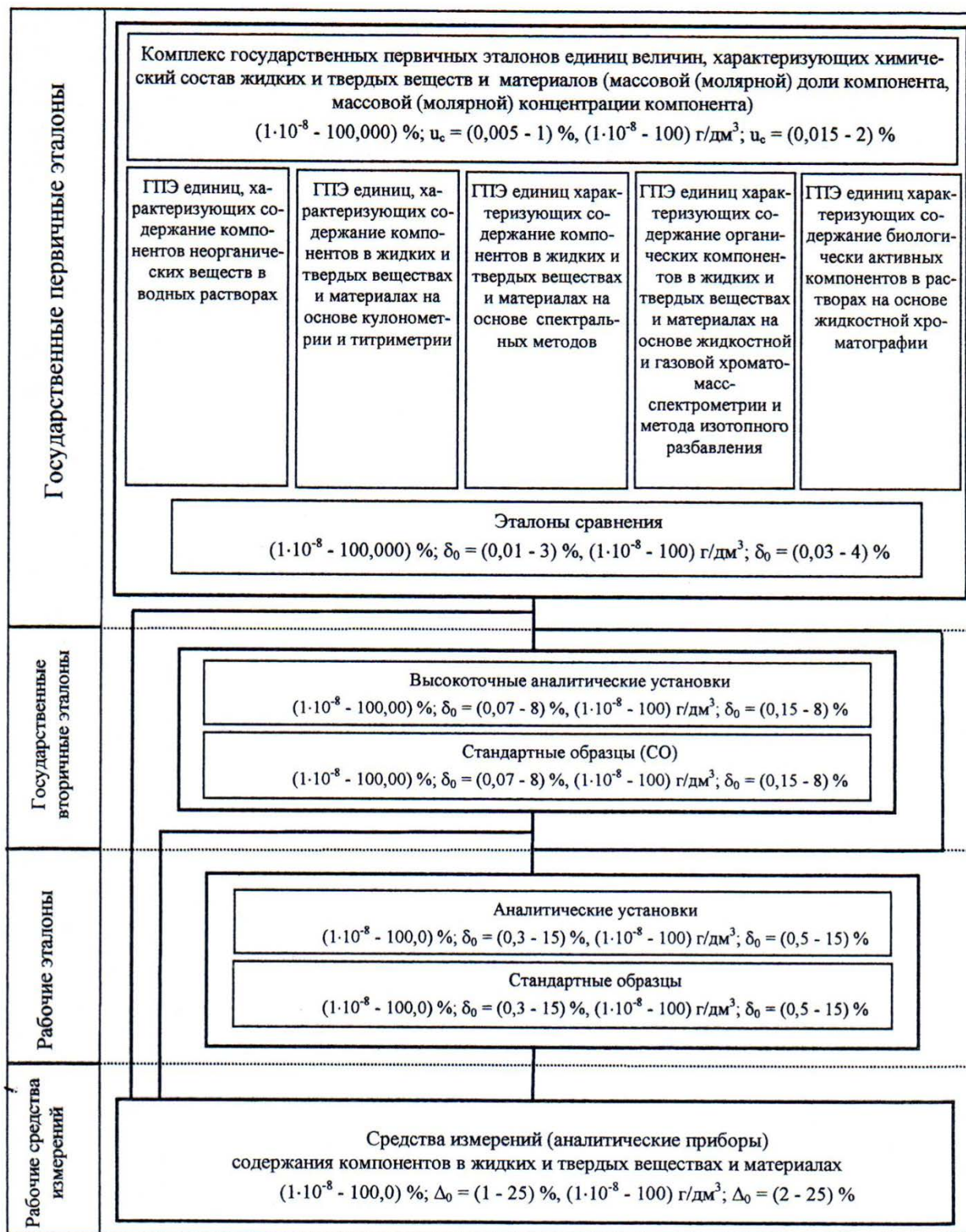


Рис. 1. Обобщенная поверочная схема для СИ (аналитических приборов) содержания компонентов в жидких и твердых веществах и материалах

Заключение

Долговременные перспективы комплексного использования водоемов и водотоков требуют изучения их современного экологического состояния и оценку уровней загрязнения с целью прогнозирования качества воды. Одним из наиболее объективных и надежных показателей состояния загрязнения водного объекта и общего уровня техногенной нагрузки на него является содержание тяжелых металлов в ДО, поскольку ДО отражают многолетние процессы накопления и трансформации вещества в водном объекте. В связи с этим, изучение современного состояния загрязнения ДО тяжелыми металлами, анализ особенностей их накопления на различных участках являются необходимыми составляющими оценки эколого-токсикологического состояния рек и каналов Санкт-Петербурга. Исключение влияния токсичных ДО является одной из первоначальных задач для обеспечения экологической безопасности водоемов Санкт-Петербурга.

Значимость рассматриваемой проблемы и недостаток экспериментальных работ в этом направлении определили цель исследований – выяснение особенностей накопления форм нахождения тяжелых металлов в абиотических компонентах экосистемы, необходимых при выборе и обосновании мероприятий по максимальному предотвращению неблагоприятного воздействия на состояние водных объектов, на условия обитания рыб и получение экологически безопасных рыбопродуктов.

Публикации

1. *Быковская Е.А.* Обоснование необходимости очистки рек и каналов Санкт-Петербурга от донных отложений // Сборник работ студентов НИУ ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга. СПб., 2013. С. 25–35.
2. *Быковская Е.А., Кустикова М.А.* Обоснование выбора метода исследования форм нахождения тяжелых металлов в абиотических компонентах экосистемы // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 3. СПб., 2014. С. 58.
3. *Быковская Е.А.* Обоснование выбора метода исследования форм нахождения тяжелых металлов в абиотических компонентах экосистемы для контроля экологической эффективности модернизированных промышленных объектов // Будущее машиностроения России: тезисы докладов VII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М., 2014. С. 248–249.
4. *Быковская Е.А., Кустикова М.А.* Обоснование выбора метода исследования форм нахождения тяжелых металлов в абиотических компонентах экосистемы для контроля экологической эффективности модернизированных промышленных объектов [Электронный ресурс] // Будущее машиностроения России: VII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов, 24–27 сентября 2014 года. Электронный сборник трудов конференции. М., 2014. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Литература

1. *Перевозников М.А., Богданова Е.А.* Тяжелые металлы в пресноводных экосистемах. СПб., 1999. – 228 с.
2. ПНД Ф 14.1:2.49-96. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов мышьяка в природных и сточных водах фотометрическим методом с диэтилдитиокарбаматом серебра. 2004.
3. ПНД Ф 14.1:2.4.140-98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации бериллия, ванадия, висмута, кадмия, кобальта, меди, молибдена, мышьяка, никеля, олова, свинца, селена, серебра, сурьмы и хрома в питьевых, природных, сточных водах методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией. 2007.
4. Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге: Аналитический обзор за 25 лет / Под ред. Д.А. Голубева, Н.Д. Сорокина. СПб., 2004. – 784 с.

5. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2012 году / Под ред. Д.А. Голубева, Н.Д. Сорокина. СПб., 2013. – 464 с.

6. Спектрометр эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой «Эридан 500». Руководство по эксплуатации. СПб., 2004. – 34 с.



Васильев Александр Сергеевич
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: yoshikawa06@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

А.С. Васильев

Научный руководитель – доцент А.В. Краснящих

Цели работы – реализация и исследование методов комплексирования цифровых изображений многоспектральных оптико-электронных систем (ОЭС). В ходе работы над проектом был проведен теоретический анализ методов, разработаны математическая и имитационная компьютерные модели многоспектральной ОЭС совмещения цифровых изображений. На основе исследования этих моделей продемонстрировано влияние различных факторов на результат комплексирования. В работе также были рассмотрены и предложены для использования методы объективной оценки качества комплексированного изображения.

На сегодняшний день развитие распределенных многоспектральных ОЭС играет все большую роль во многих областях промышленности, в системах безопасности и противодействия терроризму. Широкое применение они получили в военной технике благодаря возможности обнаружения и распознавания военных единиц потенциального врага путем регистрации собственного излучения в различных диапазонах электромагнитного спектра [1]. Но современные многоспектральные ОЭС были бы невозможны без применения метода комплексирования изображений. Он позволяет существенно увеличить эффективность многоспектральных ОЭС, упростить процесс восприятия и анализа получаемого изображения за счет суммирования информационных признаков объектов в различных спектральных диапазонах.

Под комплексированием понимается такое совмещение нескольких изображений, которое приводит к повышению информативности по сравнению с исходными. Обобщенная структурная схема многоспектральной ОЭС с применением метода комплексирования представлена на рис. 1.

Объект наблюдения формирует излучение в широком спектральном диапазоне. Приемная оптическая система собирает поток излучения и формирует изображения объекта. Система разделения спектрального диапазона делит весь спектр излучения объекта на n отдельных каналов ($\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3, \dots, \Delta\lambda_{n-1}, \Delta\lambda_n$). В электронном блоке (ЭБ) происходит обработка сигналов, получаемых в разных спектральных диапазонах. Система комплексирования (СК) объединяет изображения, соответствующие разным спектральным диапазонам, в единое в соответствии с требованиями результирующего изображения.

Устройство вывода (УВ) передает комплексированное изображение в систему отображения (дисплей) или другим устройствам дешифрования (обнаружения, распознавания, классификации, идентификации) [1].

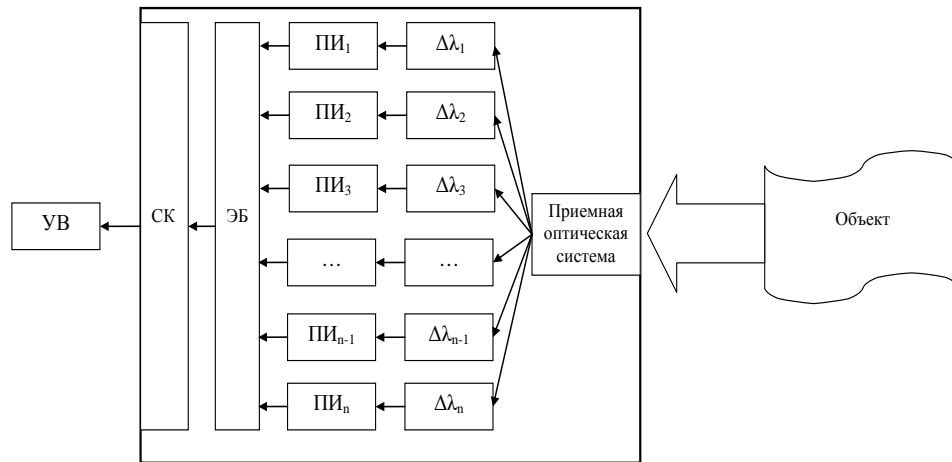


Рис. 1. Структурная схема многоспектральной ОЭС на основе комплексирования изображений

В системе комплексирования осуществляется формирование комплексированного изображения, которое реализуется на основе регистрации информационного поля объекта наблюдения, полученного разноспектральными каналами измерения. Результатом комплексирования информации является множество Z , представляющее объединенное множество:

$$F_1, F_2, \dots, F_n \subset Z^r,$$

где F_n – исходное изображение n -го канала; r – размерность комплексированного изображения, для большинства случаев равная двум, однако в некоторых задачах (например, в задачах с применением объемных изображений) может быть и больше.

Существует множество методов комплексирования изображений, обладающих своими преимуществами и недостатками при решении конкретных задач. В данной работе рассмотрены те из них, которые применяются наиболее широко.

Метод усреднения является простейшим. Он требует минимальных вычислительных затрат, но не использует те информационные преимущества, которые дает наличие нескольких отличающихся изображений. Комплексирование методом усреднения осуществляется по следующему выражению:

$$Z = \frac{F_1(x, y) + F_2(x, y) + \dots + F_n(x, y)}{n}.$$

Комплексирование по методу маски предполагает, что одно из входных изображений является маской для другого. Предположим, что в процессе комплексирования изображение F_1 будет наложено на изображение F_2 . Тогда при рассмотрении изображений как двумерных наборов отсчетов яркости над изображением F_2 должна быть реализована операция пороговой фильтрации, в результате которой получится маска наложения на изображение F_1 . После этого результирующее комплексированное изображение будет представлять собой совокупность F_1 и F_2 . При этом значение в каждой точке пространства будет определяться либо соответствующим значением из изображения F_1 , либо в случае, если значение соответствующей точки в изображении F_1 равно нулю, за результирующее принимается значение пикселя из изображения F_2 . Комплексирование по методу маски осуществляется по следующему выражению:

$$\mathbf{Z} = \begin{cases} F_1(x, y), F_1(x, y) > R \\ F_2(x, y), F_2(x, y) > R \end{cases},$$

где R – уровень порогового фильтра. При использовании комплексирования методом маски основную сложность представляет задание уровня порогового фильтра. Неправильный его выбор может привести к потере в результирующем изображении информативных элементов.

Метод чересстрочного комплексирования реализует алгоритм на основе построчного чередования одного изображения относительно другого. При этом результат комплексирования для пары изображений размером $M \times N$ будет иметь разрешение $2M \times N$:

$$\mathbf{Z} = \begin{cases} \mathbf{Z}(2x, y) = F_1(x, y) \\ \mathbf{Z}(2x + 1, y) = F_2(x, y) \end{cases}.$$

Метод комплексирования Фурье-спектров изображений основан на анализе и комбинировании частотных составляющих спектров Фурье локальных окрестностей изображений. Метод может быть применен для любого количества каналов измерения и не зависит от их спектрального диапазона работы:

$$f_{\mathbf{Z}}(0, 0) = f_1(0, 0), f_{\mathbf{Z}}(\omega_x, \omega_y) = f_2(\omega_x, \omega_y), \text{ при } \omega_x, \omega_y \neq 0,$$

где $f_{\mathbf{Z}}, f_1, f_2$ – Фурье-спектры комплексированного и исходных изображений соответственно; ω_x, ω_y – пространственная частота.

Для исследования рассмотренных методов комплексирования изображений на основе обобщенной структурной схемы многоспектральной ОЭС была реализована математическая модель синтеза исходных изображений n -го канала. Математическая модель системы синтезировала следующие звенья:

- контрольный элемент (изображение объекта),
- оптическую систему,
- шумы на приемнике излучения и видеоусилителе,
- фоновое излучение.

Оценка качества результирующего изображения проводилась на основе расчета значения энтропии и дисперсии яркости. Энтропия является мерой информативности изображений:

$$E = - \sum_{k=0}^{L-1} h(k) \log(h(k)),$$

где E – информационная энтропия изображения, $h(k)$ – нормализованная гистограмма изображения с диапазоном яркости $[0, L-1]$.

Дисперсия яркости изображения характеризует средний контраст:

$$\sigma^2 = \sum_{k=0}^{L-1} (k - m)^2 h(k),$$

где σ^2 – дисперсия яркости изображения, $m = \sum_{k=0}^{L-1} k \cdot h(k)$ – математическое ожидание уровня яркости [2].

Сравнение значений дисперсии яркости и энтропии для изображений, полученных разными методами комплексирования, представлено на рис. 2.

По результатам исследования можно утверждать, что наибольшей информационной энтропией обладают изображения, полученные методами маски, усреднения и комплексирования Фурье-спектров. Метод чересстрочного комплексирования позволил увеличить информативность относительно второго исходного изображения за счет

добавления информационных признаков первого, однако результирующее значение энтропии при этом существенно ниже значений, полученных другими методами.

Наилучший показатель качества по критерию оценки дисперсии яркости изображения показал метод усреднения. За счет сглаживания локальных вариаций яркости на изображении данный метод позволяет уменьшить его шумовые составляющие и тем самым повысить контраст.

Для исследования влияния смещения разноспектральных объектов для различных методов комплексирования были синтезированы изображения объектов в разных спектральных диапазонах со смещением пространственного положения одного объекта относительно другого с шагом 0,2 пикселя. Результаты изменения информационной энтропии и дисперсии яркости при смещении объектов представлены на рис. 3.

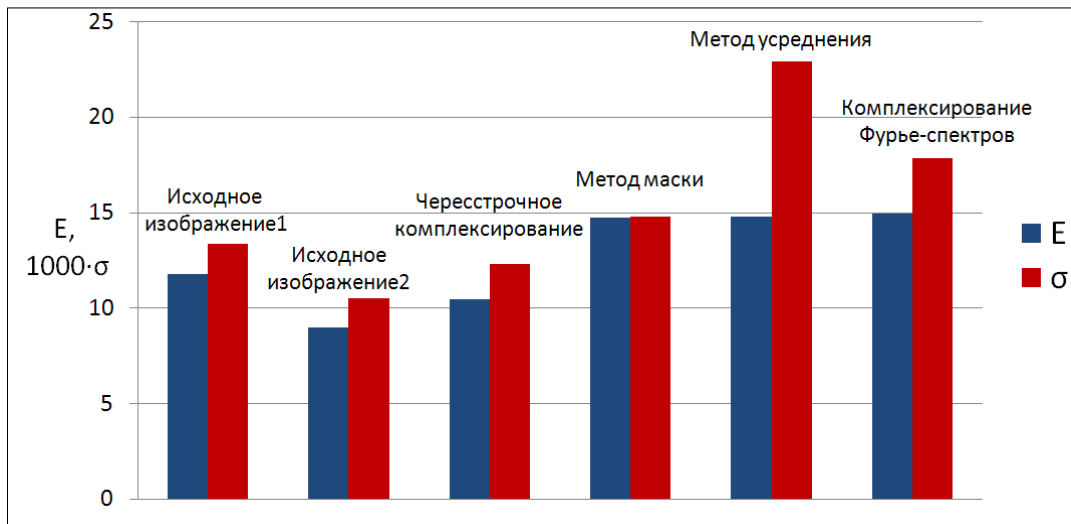


Рис. 2. Диаграмма сравнения качества изображений, полученных разными методами комплексирования

По результатам анализа полученных данных дисперсии яркости можно сказать, что зависимости контраста изображения при постепенном наложении двух объектов уменьшаются для различных методов.

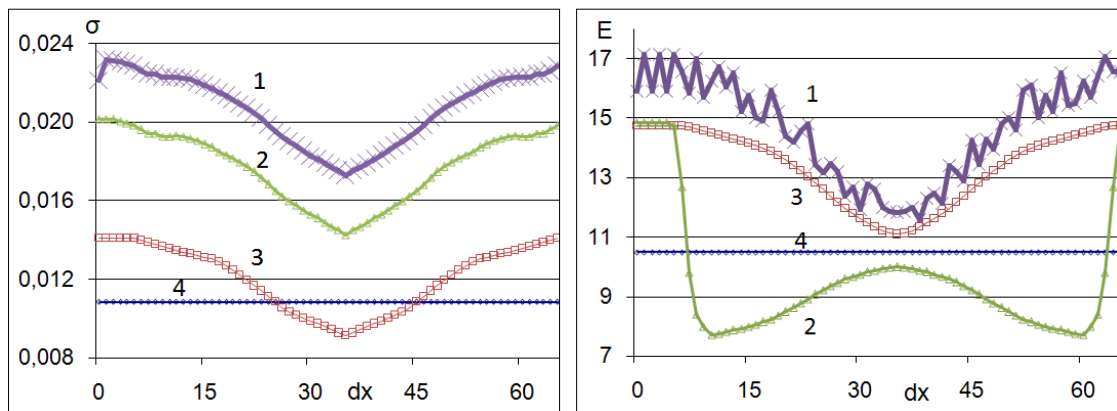


Рис. 3. Зависимости изменения: а – дисперсии яркости; б – информационной энтропии при смещении разноспектральных объектов: 1 – метод Фурье-спектров; 2 – метод усреднения; 3 – метод маски; 4 – метод чересстрочного комплексирования

По результатам анализа изменения информационной энтропии можно заключить, что для методов маски и комплексирования Фурье-спектров зависимость информативности изображения плавно уменьшается в отличие от метода усреднения, где происходит резкое падение энтропии изображения.

Заключение

В процессе работы над проектом была разработана методология комплексирования изображений, проведен теоретический анализ методов комплексирования цифровых изображений многоспектральных ОЭС.

На основе структурной схемы многоспектральной ОЭС комплексирования изображений с использованием математических методов теории преобразования оптического излучения была разработана имитационная математическая модель синтеза изображения многоспектральной ОЭС. На ее основе проведены исследования методов комплексирования цифровых изображений.

Для сравнительной оценки методов были разработаны критерии оценки качества изображения на основе расчета значений информационной энтропии как показателя информативности и дисперсии яркости – как показателя его контраста.

Результаты показали, что наилучшими характеристиками по информативности и контрастности изображения обладает метод комплексирования на основе усреднения за счет сглаживания локальных вариаций яркости на изображении.

Стоит отметить метод чересстрочного комплексирования, который в проведенных исследованиях показал инвариантность значений дисперсии яркости и информационной энтропии при смещении объектов. Однако среднее значение его характеристик показывают меньшую эффективность по сравнению с другими методами.

Полученные результаты могут найти широкое применение в программных средствах обработки цифровых изображений многоспектральных ОЭС.

Публикации

1. *Васильев А.С., Кортаев В.В., Краснящих А.В., Лаиманов О.Ю., Ненарокомов О.Н.* Совмещение тепловизионного и телевизионного изображений при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 4. С. 12–17.
2. *Васильев А.С., Краснящих А.В., Кортаев В.В., Лаиманов О.Ю., Лысенко Д.Ю., Ненарокомов О.Н., Широков А.С., Ярышев С.Н.* Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 12. С. 50–55.
3. *Васильев А.С.* Методология комплексирования изображений // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб., 2014. С. 80–82.

Литература

1. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М., 2007. – 192 с.
2. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М., 2012. – 1104 с.



Васильев Евгений Андреевич
Гуманитарный факультет
Кафедра философии
E-mail: evgene.vasiliev@gmail.com

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЭПИСТЕМОЛОГИИ: ИСТОРИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАЗОВЫХ ПОНЯТИЙ И ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С СОВРЕМЕННЫМИ КОГНИТИВНЫМИ НАУКАМИ

Е.А. Васильев

Научный руководитель – доцент А.С. Милославов

Работа посвящена изучению предпосылок и ранней стадии формирования вычислительной эпистемологии, или формальной теории обучения. Внимание также уделяется возможным путям взаимодействия данной теории с логикой, лингвистикой и другими когнитивными дисциплинами, предметом которых могут являться процессы обучения, получения общих выводов на основе неполных эмпирических сведений.

Целью работы является описание условий, способствовавших возникновению формальной теории обучения, анализ ее основных положений и возможности применения методов в предметном поле эпистемической логики.

В результате проведенной работы была переведена статья Э. Голда [1], ранее не переводившаяся на русский язык, подготовлена публикация, посвященная данному этапу развития формальной теории обучения.

Теория обучения задается вопросом о границах того, что может быть изучено – какие объекты, при каких условиях и в какой степени мы могли бы назвать потенциально изучаемыми. Под изучением в данной теории понимается идентификация какого-либо объекта (функции, формального языка, пропозиции), в процессе которой изучающий получает лишь «косвенные» сведения, характеризующие данный объект (значения функции, примеры употребления языка). С помощью такой модели возможно рассматривать различные процессы, имеющие схожую логическую структуру, например, изучение языка детьми, построение эмпирической научной теории на основе экспериментов. В каждом конкретном случае задача заключается в определении метода изучения – алгоритма, предписывающего какие выводы нужно совершать при получении информации об объекте в определении границ применимости того или иного метода, а также в определении его эффективности. Предпосылками, сделавшими возможным формирование вычислительной эпистемологии, являются теория вычислимости и теория сложности вычислений.

Такие философы, как Ч.С. Пирс [2], Р. Карнап [3], пытались построить классификацию индуктивных методов, найти общие законы, характеризующие индуктивную рациональность. В отличие от подобных теорий формальная теория обучения занимается выявлением наиболее «стратегически успешных» в том или ином контексте методов. В этот контекст входят цели, поставленные изучающим, тип доступной ему информации, доступное ему время и другие условия. Одним из важных ученых, работы которого привели к появлению вычислительной эпистемологии, является американский философ Хилари Патнэм. В своей статье [4] он доказал, что введенное Р. Карнапом понятие степени подтверждения неадекватно задаче найти формализацию индуктивных методов в эмпирических науках.

Основные понятия, которыми оперирует формальная теория обучения, вводятся Э. Голдом в статье [1]. Ключевые понятия теории – изучающий и модель изучаемости. Модель изучаемости состоит из трех компонентов – определения изучаемости, способа

предоставления изучающему информации и отношения именованию. Выделяется несколько определений модели изучаемости – изучаемость в пределе, конечная изучаемость и изучаемость за конечное время. Два вида предоставления информации – это текст и информант. Текст представляет собой положительную информацию, то есть примеры употребления языка, на основе которых изучающий выдвигает гипотезы о его грамматике. Информант предоставляет как положительную, так и отрицательную информацию, а именно отвечает на запрос изучающего, является ли данная цепочка символов цепочкой, построенной в соответствии с грамматикой искомого языка. Информант является довольно эффективным методом предоставления информации, то есть с его помощью оказывается возможным идентифицировать более широкий класс языков. Двумя отношениями именования являются генератор и тестер. В совокупности эти виды компонентов модели дают двенадцать моделей изучаемости.

Стоит отметить, что некоторые из этих понятий в том или ином виде появились несколько раньше: понятие «идентификации перечислением» упоминается в работе Р. Соломонова [5], конечная идентификация у Э. Джилла в [6]. Однако данные понятия вводились для решения поставленных авторами задач внутри исследуемых ими областей и не составляли цельной теории обучения.

Помимо введения понятийного аппарата, в статье [1] приводятся доказательства важнейших результатов относительно идентификации в пределе:

- класс всех конечных языков идентифицируем в пределе с помощью текста;
- класс языков, содержащий все конечные и по крайней мере один бесконечный язык, не идентифицируем в пределе с помощью текста.

Данные результаты позднее были обобщены, а также использованы для исследования идентификации объектов, отличных от формальных языков.

В 1975 г. Л. Блум и М. Блум [7] обобщили вторую из приведенных выше теорем, введя понятие «замыкающей последовательности». Такая последовательность является последовательностью элементов языка, получаемой изучающим, добавление к которой новых компонентов не влияет на решение изучающего относительно идентичности данного языка. Как только изучающий получает все элементы замыкающей последовательности, его гипотеза об идентичности языка становится корректной и далее не изменяется. Обобщенная теорема выглядит следующим образом: если изучающий идентифицирует язык в пределе, то должна существовать замыкающая последовательность, при получении которой изучающий выдвигает корректную гипотезу об идентичности данного языка.

Класс языков оказывается идентифицируемым, если каждый язык класса содержит в себе подмножество – идентификатор. Идентификатором является такое подмножество, наличие которого отличает язык от других языков того же класса.

Интересным представляется использование методов формальной теории обучения в предметной области эпистемической логики – логики знания и убеждения. Ее модели позволяют рассматривать как свойства индивидуальных агентов, состоящих в отношении к некоей пропозиции, выражаемой словами «знать p » или «быть убежденным, что p », так и строить более сложные сценарии, описывающие динамику знания и убеждения в группе взаимодействующих агентов. При этом используются такие понятия, как «публичное знание», «распределенное знание», «отменяемое знание», «публичное анонсирование» и т. д. Язык эпистемической логики – это язык модальной логики, в котором модальности получают соответствующую интерпретацию, а в качестве семантики, как правило, выступает семантика Крипке. Впервые понятие «публичного анонсирования» было введено Я. Плазой в работе [8]. Балтаг и Мосс в [9] используют семантику Крипке для построения не только моделей знания агентов, но и для моделей действий, изменяющих эти знания.

Обмен достижениями может быть полезным как для теории обучения, так и для эпистемической логики. Формальная теория обучения, концептуально ограниченная рассмотрением внутренней динамики одного агента, может быть расширена таким образом, чтобы рассматривать случаи взаимного и группового обучения, сложные случаи

взаимодействия обучающегося и обучающего. Некоторые шаги в этом направлении предприняты в работах Н. Герасимчук [10].

Заключение

В рамках данного проекта были исследованы предпосылки формирования вычислительной эпистемологии. Прослежена связь с развитием в 1930-х годах теории вычислимости, теории сложности вычислений, а также с работами неопозитивистов, в частности Р. Карнапа. Охарактеризованы основные понятия и теоремы формальной теории обучения, введенные Э. Голдом в статье [1] и в исследованиях 1970–1980-х гг. Выполнен комментированный перевод данной статьи. Описаны возможные пути взаимодействия формальной теории обучения и эпистемической логики.

Публикации

1. *Васильев Е.А.* Математическое понятие «вынуждения» и гносеология // Дні науки філософського факультету – 2014. Міжнародна наукова конференція (15–16 квітня 2014 року). Матеріали доповідей та виступів. Київ, 2014. Ч. 3. С. 67–68.
2. *Васильев Е.А.* Техника форсинга в вычислительной эпистемологии // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 3. СПб., 2014. С. 274–275.

Литература

1. *Gold E.M.* Language identification in the limit // *Information and Control*. 1967. Vol. 10. No 5. P. 447–474.
2. *Carnap R.* *Logical Foundations of Probability*. Chicago, 1962. – 613 p.
3. *Peierce Ch. S.* How to make our ideas clear // *Popular Science Monthly* 12 (January 1878). 1878. P. 286–302.
4. *Putnam H.* Degree of confirmation and inductive logic // *The Philosophy of Rudolf Carnap*. 1963. P. 761–783.
5. *Solomonoff R.J.* A formal theory of inductive inference. Part I // *Information and Control*. 1964. Vol. 7. No 1. P. 1–22.
6. *Gill A.* State-identification experiments in finite automata // *Information and Control*. 1961. Vol. 4. No 2–3. P. 132–154.
7. *Blum L., Blum M.* Toward a mathematical theory of inductive inference // *Information and Control*. 1975. Vol. 28. No 2. P. 125–155.
8. *Plaza J.A.* Logics of public communications // *Proceedings of the 4th International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems*. 1989. P. 201–216.
9. *Baltag A., Moss L.S.* Logics for epistemic programs // *Synthese*. 2004. Vol. 139. No 2. P. 165–224.
10. *Gierasimczuk N.* Bridging learning theory and dynamic epistemic logic // *Synthese*. 2009. Vol. 169. No 2. P. 371–384.



Ведяков Алексей Алексеевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: vedyakov@gmail.com

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УДАЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ ПО ДИНАМИЧЕСКОМУ КАНАЛУ СВЯЗИ

А.А. Ведяков

Научный руководитель – профессор А.А. Бобцов

Проект посвящен синтезу системы управления удаленным динамическим объектом по динамическому каналу связи. Ставится задача слежения за периодическим сигналом с неизвестными параметрами. Модель канала связи описывает нестационарное запаздывание.

Рассматривался удаленный объект управления

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - h(t)), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (2)$$

где $x \in R^n$ – вектор переменных состояния, $y \in R$ – выходная регулируемая переменная, $u \in R$ – результирующее управляющее воздействие, $h(t)$ – заданное нестационарное запаздывание, $A_{n \times n}$ – матрица состояния, B и C^T – n -мерные вектор-столбцы.

В качестве задающего сигнала, определяющего цели функционирования объекта управления, рассматривался периодический сигнал

$$g(t) = \sigma + \delta(t) + \sum_{i=0}^l [\mu_i \sin(\omega_i t) + v_i \cos(\omega_i t)], \quad (3)$$

где σ , μ_i и v_i – неизвестные параметры, ω_i – неизвестные частоты, l – количество гармоник, $\delta(t)$ – аддитивная составляющая в задающем воздействии, характеризующая отличие сигнала от чисто гармонического.

Допущение 1. Матрица A гурвицева.

Допущение 2. Подпространства управляемости P_c и наблюдаемости P_o объекта управления линейно зависимы, то есть их пересечение $P_c \cap P_o$ не является нулевым вектором.

Допущение 3. Передаточная функция системы $W(s)$ по управляющему воздействию не обращается в ноль для частот задающего воздействия.

Допущение 4. Частоты задающего воздействия не меньше некоторого известного числа ω_0 , то есть $\omega_i \geq \omega_0, i = \overline{1, l}$.

Требовалось синтезировать закон управления $u(t)$ по выходу, обеспечивающий ограниченность всех траекторий системы относительно желаемого поведения системы:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - g(t)| \leq b, \quad (4)$$

где b – некоторая константа.

В случае мультигармонического задающего сигнала и отсутствия помех измерения, закон управления должен гарантировать сходимость ошибки слежения к нулю

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - g(t)| = 0. \quad (5)$$

В первой части работы строится устройство оценивания параметров задающего воздействия, доказывається экспоненциальная сходимость к нулю ошибок оценивания.

Во второй части синтезируется адаптивный закон управления, обеспечивающий решение задачи слежения за задающим воздействием и асимптотическую сходимость к нулю ошибки оценивания.

В третьей – описывается подход уменьшения влияния помех в канале связи и ошибок измерения на показатели качества работы системы.

В результате исследования для слежения за неизвестным входным сигналом вида (3) разработан новый адаптивный алгоритм управления удаленным динамическим объектом по динамическому каналу связи, робастный по отношению к помехам в канале связи и погрешностям измерения.

Система управления характеризуется следующими свойствами:

- малой динамической размерностью;
- низкой вычислительной сложностью;
- использованием минимума априорной информации о внешней среде (требуется знать только количество главных гармоник в сигнале задания и его форму с точностью до аддитивной составляющей. Нижняя граница частоты, используемая при доказательстве, может быть сколь угодно малой при условии ее положительности);
- робастностью по отношению к помехам в каналах связи, наличию аддитивных составляющих в возмущающем воздействии, а также ошибок измерения;
- работоспособностью при наличии нестационарного запаздывания в канале управления.

Была синтезирована схема оценивания параметров задающего сигнала, проанализирована ее работоспособность в условиях помех и ошибок измерения. С использованием частотных методов синтезирован закон управления, сформулированный в виде теоремы, решающий поставленную задачу слежения за задающим сигналом вида (3). Были проанализированы статические и динамические свойства полученной системы управления, выработаны рекомендации по настройке параметров алгоритма. Проанализировано влияние помех в канале связи на получаемые оценки и работоспособность алгоритма оценивания и управления в целом. Исследована возможность снижения влияния шума в измерениях на процесс оценивания.

Публикации

1. Pyrkin A., Bobtsov A., Kolyubin S., Vedyakov A., Borisov O., Gromov V. Stabilization of nonlinear system with input delay and biased sinusoidal disturbance // Proceedings of the 19th IFAC World Congress. Cape Town, 2014. Vol. 19. Part 1. P. 12104–12109.
2. Pyrkin A., Bobtsov A., Nikiforov V., Vedyakov A., Kolyubin S., Borisov O. Output control approach for delayed linear systems with adaptive rejection of multiharmonic disturbance // Proceedings of the 19th IFAC World Congress. Cape Town, 2014. Vol. 19. Part 1. P. 12110–12115.
3. Pyrkin A., Bobtsov A., Vedyakov A. Output Adaptive Controller for MIMO Plant with Input Delay and Multisinusoidal Disturbance // Proceedings of the 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems. Saint-Petersburg, 2015 (under review).



Гришина Наталья Юрьевна
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра прикладной и компьютерной оптики
E-mail: natalya-g@bk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ПРОМОСКОПА»

Н.Ю. Гришина

Научный руководитель – доцент А.В. Бахолдин

Первые разработки систем виртуальной реальности начались еще в конце прошлого века. Но возникший было живой интерес публики к данной теме довольно быстро угас. Во многом это произошло потому, что для создания эффекта виртуальной реальности требовалось громоздкое, сложное в эксплуатации и крайне дорогостоящее оборудование, недоступное абсолютному большинству пользователей. Кроме того, само создание достаточно достоверной графики на тот момент было невозможно.

Только в последние годы начали появляться разработки портативных устройств, способных в эпоху трехмерного кино, игровых вселенных и реалистичной компьютерной графики усилить создаваемое ими ощущение «оторванности» от реальности. Так, несколько крупных мультимедийных компаний заявили о разработке очков виртуальной реальности. Представленные ими модели устройств компактны и не требуют дополнительного оборудования, так как работают с уже существующими компьютерами и игровыми консолями. Даты выхода полноценных версий еще не объявлены, однако очевидно, что длительное время после поступления в открытую продажу представленные модели не будут отличаться разнообразием и привлекательной ценой.

В качестве доступной альтернативы виртуальным очкам могут выступать стереоскопические системы, работающие с портативными мультимедийными устройствами, имеющимися практически у каждого современного человека, например со смартфонами. Такая замена если и не позволит достичь аналогичного уровня погружения в виртуальную реальность, то в сочетании с качественным аудиосопровождением может быть использована для игр или просмотра кино. Стереоскопические системы, предназначенные для совместного использования с планшетными компьютерами, оказываются слишком громоздкими по сравнению с виртуальными очками и потому могут выступать лишь основой для создания устройства, способного найти свое применение во многих областях. Именно таким устройством и является рассматриваемый в представленном отчете «Промоскоп».

Принципиальная схема работы «Промоскопа» показана на рис. 1. По двум разделенным каналам изображения с дисплеев планшетных компьютеров (D_1) и (D_2) окулярами (O_1) и (O_2) проецируются в зрачки обоих глаз наблюдателя (G_1) и (G_2). Наклонные зеркала (Z_1) и (Z_2) необходимы для обеспечения правильной глазной базы b наблюдателя.

Практически во всех подобных стереоскопических системах применяют простейшие окуляры, чаще всего состоящие из одной линзы и не отличающиеся высоким уровнем коррекции аберраций. Из последних наибольшие искажения в наблюдаемую пользователем картину вносит дисторсия. Чтобы компенсировать ее негативное влияние, исходный видеоряд приходится подвергать дополнительной обработке, что в конечном счете сильно ухудшает его качество. Использование в стереосистемах ортоскопических окуляров позволит во многом избежать подобных неприятных последствий.

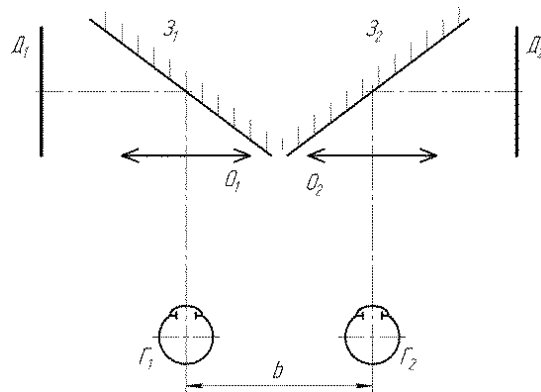


Рис. 1. Принципиальная схема работы «Промоскопа»

Таким образом, целью данного проекта является исследование и расчет оптической системы «Промоскопа», состоящей из двух ортоскопических окуляров и разводящих зрительные оси зеркала.

В ходе работы над проектом выполнены следующие задачи:

- проведен сравнительный анализ характеристик различных источников изображения;
- выбран оптимальный вариант композиции оптической схемы окуляра для стереоскопического мультимедийного стенда и проведен габаритный расчет;
- рассчитаны конструктивные параметры отдельных компонентов для выбранной схемы;
- получена конечная система, полностью удовлетворяющая предъявленным требованиям;
- проведено моделирование оптической системы, состоящей из двух окуляров и наклонных зеркал.

В «Промоскопе» источником изображения является планшетный компьютер. По результатам исследования рынка можно сделать вывод, что на сегодняшний день дисплеем с наилучшими параметрами оснащен Apple iPad Air.

Очевидная пиксельная структура дисплеев планшетных компьютеров может значительно ухудшить качество восприятия картины, наблюдаемой пользователем. Поэтому фокусное расстояние окуляра рассчитывается исходя из требований к однородности изображения.

Расчетное фокусное расстояние окуляра: $f' = 472,4$ мм.

Габаритный расчет

Габаритный расчет ортоскопического окуляра проще всего проводить в обратном ходе лучей, представив его в виде двухкомпонентной системы с вынесенным входным зрачком. На рис. 2 приведена принципиальная оптическая схема окуляра с указанием хода главного и апертурного лучей. Вынос зрачка необходим, поскольку система работает с глазом человека и важно соблюсти комфортное для наблюдения расстояние. Для правильной работы дисплея желателен телецентрический ход лучей в пространстве изображений, поэтому плоскость входного зрачка совпадает с передней фокальной плоскостью системы.

Во время работы над магистерской диссертацией было проведено исследование двухкомпонентных систем с вынесенным входным зрачком. В результате разработана методика, которая позволяет, зная общую длину системы (L) или удаление зрачка ($-a_{p1}$), определить расстояние между компонентами (d), их фокуса (f'_1 и f'_2) и положение плоскости изображения относительно совмещенных главных плоскостей второго компонента (a_2).

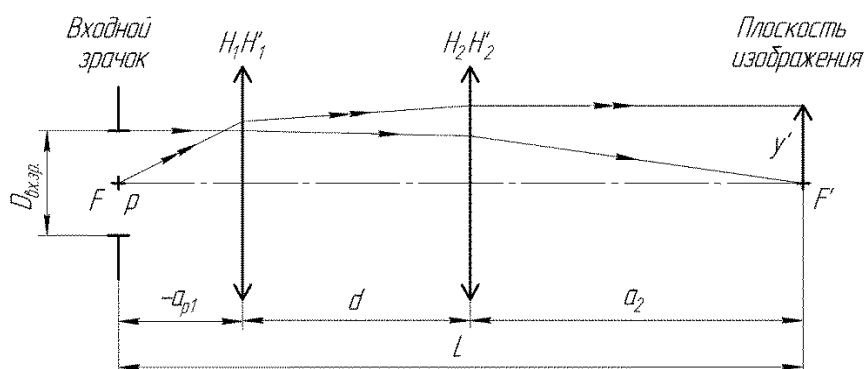


Рис. 2. Принципиальная двухкомпонентная оптическая схема окуляра: $H_1H'_1$ и $H_2H'_2$ – совмещенные главные плоскости соответственно первого и второго компонентов; d – расстояние между ними; a_{p1} – удаление входного зрачка системы от совмещенных главных плоскостей первого компонента; a_2 – расстояние от совмещенных главных плоскостей второго компонента до плоскости изображения; L – общая длина системы

Расчет конструктивных параметров

Одним из условий правильной совместной работы окуляра и дисплея планшетного компьютера является телецентрический ход главного луча в пространстве предметов, поэтому размеры второго компонента будут сопоставимы с размерами планшетного компьютера. Изготовление линз такого диаметра из стекла не представляется разумным, поэтому вполне логично здесь в качестве материала отдельных компонентов рассматривать пластик. Но добиться качественной коррекции aberrаций в состоящей из двух пластиковых одиночных линз системе невозможно. Поэтому в ходе работы было принято решение в качестве начальной рассчитывать систему, состоящую из двух компонентов, выполненных из стекла – первой одиночной линзы и склеенного компонента для коррекции хроматических aberrаций, а уменьшение габаритных размеров линз проводить уже в процессе последующей оптимизации. Нарушение телецентрического хода лучей в пространстве предметов впоследствии может быть компенсировано и в результате не окажет значительного влияния на качество изображения.

Оптимизация

В процессе проводившейся в программном обеспечении «Zemax» оптимизации начальной схемы была получена система, удовлетворяющая всем установленным для окуляра «Промоскопа» требованиям (рис. 3).

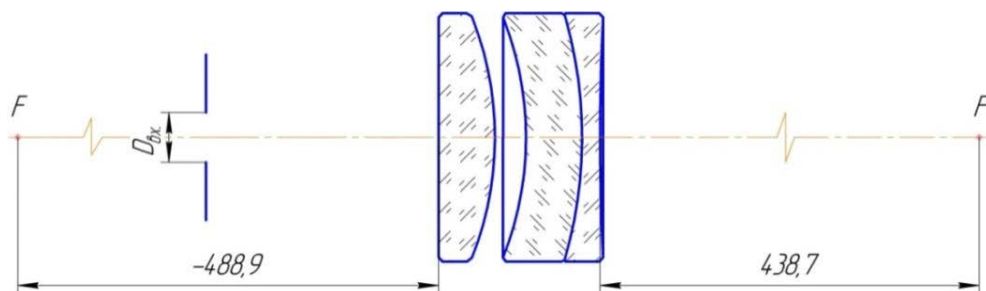


Рис. 3. Оптическая система окуляра

Основные параксиальные характеристики:

$$f' = 472,2 \text{ мм}; \omega = 29^\circ 14' 12'' \text{ (} 2y' = 246,4 \text{ мм)}; D = 6 \text{ мм.}$$

Конструктивные параметры оптической системы окуляра сведены в Табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные параметры оптической системы

Номер линзы	Радиусы кривизны, мм	Толщины, мм	Световые диаметры, мм	Марка стекла	Показатель преломления
		28,20		ВОЗДУХ	1,0
1	∞	6,83	30,0	СТК3	1,65949
	-39,26	3,77	30,0	ВОЗДУХ	1,0
2	-39,08	6,79	30,0	ТФ7	1,72822
3	-52,84	2,18	30,0	ЛК7	1,48286
	285,8	438,73		ВОЗДУХ	1,0

Глазная база человека варьируется от 54 до 74 мм. На рис. 4 показан результат моделирования обеих ветвей оптической системы «Промоскопа» при минимальном значении глазной базы.

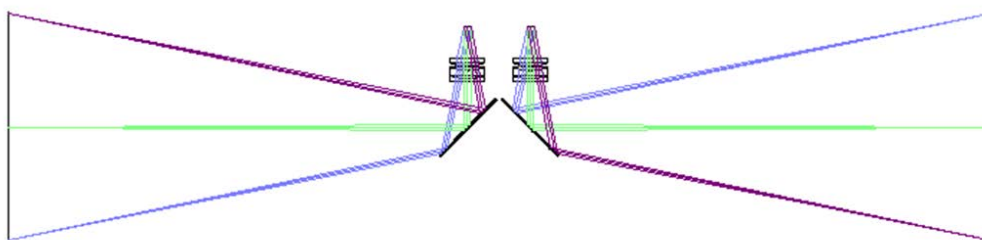


Рис. 4. Результат моделирования оптической системы «Промоскопа»

Заключение

В ходе работы над проектом был выбран наиболее подходящий источник изображения и рассчитано фокусное расстояние окуляра. На основе разработанной методики определения оптических характеристик двухкомпонентной системы с вынесенным входным зрачком проведен анализ схемных решений. В результате был выбран оптимальный вариант композиции оптической схемы окуляра для стереоскопического мультимедийного стенда и проведен габаритный расчет. Определены конструктивные параметры отдельных компонентов начальной системы. В результате оптимизации, проводившейся в программном обеспечении «Zemax», был получен ортоскопический окуляр, полностью удовлетворяющий предъявленным требованиям. Проведено моделирование оптической системы окуляра, состоящей из двух окуляров и наклонных зеркал в соответствии с описанием проекта.

Расстояние от последней поверхности окуляра до плоскости изображения достаточно для размещения зеркальной системы. Величина удаления входного зрачка позволяет наблюдателю при работе с окуляром располагаться на комфортном расстоянии, не приближая глаза слишком близко к прибору. Это обстоятельство особенно важно, потому что «Промоскоп», в отличие от тех же виртуальных очков, не является индивидуальным прибором, а санитарная обработка после каждого использования не всегда представляется возможной.

Уменьшенные в ходе оптимизации световые диаметры и толщины линз позволят при сохранении достаточно высокого уровня коррекции aberrаций обеспечить малые габаритные размеры окуляра и значительно упростить его изготовление.

Публикации

1. Гришина Н.Ю. Расчет объективов с вынесенным входным зрачком // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2012. С. 36–37.
2. Бахолдин А.В., Васильев В.Н., Гримм В.А., Гришина Н.Ю., Романова Г.Э., Смирнов С.А. Расчет объективов с вынесенным зрачком // Труды X Международной конференции «Прикладная оптика – 2012». Т. 1. СПб., 2012. С. 86–89.

3. Гришина Н.Ю. Синтез объектива для индикации информации на основе двухкомпонентной схемы. // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 14–15.

4. Гришина Н.Ю. Исследование и расчет объектива для мультимедийного стереоскопического стенда // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 10–11.



Громова Юлия Александровна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптической физики и современного естествознания
E-mail: gromova@niuitmo.ru

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И МОЛЕКУЛ ТЕТРАПИРОЛЛОВ В ПОЛИМЕРНЫХ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАНАХ

Ю.А. Громова

Научный руководитель – доцент А.О. Орлова

Гибридные структуры на основе полупроводниковых квантовых точек и тетрапиррольных соединений представляют интерес в качестве новых высокоэффективных сенсibilizаторов активных форм кислорода [1, 2]. В таких структурах ожидается существенное увеличение генерации активных форм кислорода по сравнению с традиционно используемыми тетрапиррольными соединениями за счет эффективной передачи энергии от квантовых точек к тетрапиррольным компонентам. Структуры, способные эффективно генерировать активные формы кислорода и, в частности, синглетный кислород, находят применение в фотодинамической диагностике и терапии онкологических заболеваний, стерилизации плазмы крови, а также очистке различных жидких и газообразных сред от биозагрязнений. Исключения представляют случаи, когда воздействию активных форм кислорода должны подвергаться живые организмы, то есть экспериментов *in vivo*. В этой ситуации актуально создание микрофлюидных элементов на основе пористых полимерных матриц с внедренными в них эффективными фотосенсibilizаторами активных форм кислорода. Одной из перспективных реализаций такого подхода является использование в качестве пористой матрицы полимерных трековых мембран. В данных мембранах в пристеночных слоях трековых пор возможно формирование структур на основе полупроводниковых квантовых точек и тетрапиррольных соединений, эффективно генерирующих активные формы кислорода. При этом сами поры остаются пустыми, что позволяет организовать направленное течение жидкости или газа сквозь мембрану [2, 3].

Целью проекта являлось исследование условий переноса энергии фотовозбуждения в структурах нового типа на основе полупроводниковых квантовых точек и органических молекул, сформированных в полимерных трековых мембранах.

В ходе выполнения проекта было проведено комплексное исследование фотофизических свойств гибридных структур, созданных на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) CdSe/ZnS и молекул тетра(р-триметиламино)фенилпорфина (ТАФП) в полимерных трековых мембранах [4]. В данных структурах КТ и ТАФП были использованы в качестве донора и акцептора энергии фотовозбуждения соответственно. Полученные в работе зависимости изменения интенсивности и времен затухания

люминесценции КТ от концентрации молекул ТАФП, а также зависимость сенсibilизированной люминесценции ТАФП от его концентрации в образцах однозначно указывают на реализацию высокоэффективного переноса энергии в гибридных структурах. В то же время анализ полученных зависимостей фотофизических свойств структур от концентрации акцептора показал, что в данных гибридных структурах наблюдается градиент концентрации акцептора и соответственно данная система не может быть корректно описана в рамках модели переноса энергии фотовозбуждения в жестких растворах, предложенной Фёрстером. Поэтому была разработана физическая модель переноса энергии в жестких растворах с градиентом концентрации частиц, описывающая уменьшение интенсивности люминесценции и времени затухания люминесценции донора энергии и разгорание люминесценции акцептора [5].

Полученные данные могут быть использованы для создания микрофлюидных устройств для эффективной генерации активных форм кислорода.

Публикации

1. Orlova A.O., Gromova Y.A., Savelyeva A.V., Maslov V.G. et al Track membranes with embedded semiconductor nanocrystals: structural and optical examinations // *Nanotechnology*. 2011. Vol. 22. No 45. P. 455201.
2. Orlova A.O., Gromova Y.A., Maslov V.G., Prudnikau A.V., Artemyev M.V., Fedorov A.V., Baranov A. V. Formation of structures based on semiconductor quantum dots and organic molecules in track pore membranes // *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 113. No 21. P. 214305.
3. Gromova Y.A., Orlova A.O., Maslov V.G., Fedorov A.V., Baranov A.V. Fluorescence energy transfer in quantum dot/azo dye complexes in polymer track membranes // *Nanoscale Research Letters*. 2013. Vol. 8. No 1. P. 452.
4. Orlova A.O., Gromova Y.A., Maslov V.G., Andreeva O.V., Baranov A.V., Fedorov A.V. et al Reversible photoluminescence quenching of CdSe/ZnS quantum dots embedded in porous glass by ammonia vapor // *Nanotechnology*. 2013. Vol. 24. No 33. P. 335701.
5. Orlova A.O., Kurochkina M.A., Gromova Y.A. et al Resonant energy transfer in rigid solutions of semiconductor quantum dots with a concentration gradient // *Proceedings of SPIE*. 2014. Vol. 9126. P. 912617.
6. Аннас К.И., Громова Ю.А., Орлова А.О., Маслов В.Г., Федоров А.В., Баранов А.В. Фотоиндуцированная диссоциация комплексов квантовых точек селенида кадмия с молекулами азокрасителя // *Оптический журнал*. 2014. Вып. 8. Т. 81. С. 25–30.

Литература

1. Nyokong T., Ahsen V. Photosensitizers in Medicine, Environment, and Security. 2012. – 664 p.
2. Samia A., Dayal S., Burda C. Quantum dot-based energy transfer: perspectives and potential for applications in photodynamic therapy // *Photochemistry and Photobiology*. 2006. Vol. 82. No 3. P. 617–625.
3. Orlova A.O., Gromova Y.A., Savelyeva A.V., Maslov V.G. et al Track membranes with embedded semiconductor nanocrystals: structural and optical examinations // *Nanotechnology*. 2011. Vol. 22. No 45. P. 455201.
4. Orlova A.O., Gromova Y.A., Maslov V.G. , Prudnikau A.V., Artemyev M.V., Fedorov A.V., Baranov A.V. Formation of structures based on semiconductor quantum dots and organic molecules in track pore membranes // *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 113. No 21. P. 214305.
5. Orlova A.O. , Kurochkina M.A., Gromova Y.A. et al Resonant energy transfer in rigid solutions of semiconductor quantum dots with a concentration gradient // *Proceedings of SPIE*. 2014. Vol. 9126. P. 912617.



Дмитриева Светлана Петровна
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра оптико-цифровых систем и технологий
E-mail: job_8@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

С.П. Дмитриева

Научный руководитель – профессор А.В. Демин

Одним из важнейших моментов обеспечения успешной научно-производственной и социальной деятельности человечества является наличие информации о состоянии окружающей среды и технических систем как в реальном масштабе времени, так в виде прогноза их поведения и состояния в соответствии с априорными данными. На сегодняшний день известны различные методы и средства получения и прогнозирования информации об объекте и его состояниях. Для получения апостериорных данных наибольшее применение находят не контактные методы, а например дистанционное зондирование (ДЗ) поверхности Земли в оптическом диапазоне.

В данном исследовании рассматривается ДЗ объекта, то есть процесс регистрации параметров объекта с применением методов неконтактного анализа, а именно зондирования окружающей среды в оптическом диапазоне с помощью различных оптико-цифровых систем (ОЦС). Методы ДЗ основаны на регистрации в аналоговой или цифровой форме оптической информации в фотоприемном устройстве (ФПУ). Часть результатов ДЗ сразу поступает в цифровом виде, что позволяет применять современные компьютерные технологии для их обработки и использования. Цифровое изображение формируется с помощью ФПУ, состоящего из множества чувствительных элементов, что представимо в форме раstra как числовая матрица.

Процесс ДЗ сводится к следующим основным направлениям и практическим задачам, стоящим перед ОЦС ДЗ:

- мониторинг состояния окружающей среды;
- контроль параметрических численных и качественных показателей функционирования технических систем;
- предотвращение несанкционированного воздействия на технический объект.

Задача прогнозирования данных на выходе по наблюдаемым входным (или экспериментальным) данным носит название проблемы наблюдаемости и возникает из необходимости прогнозирования будущего поведения системы ДЗ.

Возможность прогнозировать состояния и поведение систем ДЗ основывается на обработке экспериментальных характеристик объектов. Основной принцип прогнозирования заключается в метаобобщении экспериментальных данных: обобщая многозначные статистические причинно-следственные связи и вытекающие из них следствия, можно вывести определенные закономерности – законы, которые имеют свойство проявляться не в совершенно точной величине, а в среднем, то есть в каких-то пределах возможных колебаний, как тенденции, иногда с отклонениями. Это не позволяет надеяться на однозначное, абсолютно точное предвидение будущего, но позволяет утверждать, что чем более стабильно развитие какого-либо процесса, чем устойчивее взаимосвязи между изучаемыми явлениями, тем выше вероятность получения достоверного прогноза.

Наиболее полную информацию об объекте – составляющих его веществах, их предыстории и расположении – содержит инфракрасное излучение, испускаемое объектом.

Наблюдение и восприятие этой информации с помощью системы обнаружения и соответствующая ее обработка позволят определить и проконтролировать параметры, которые трудно или невозможно измерить непосредственно. Сбор и анализ данных о процессах, происходящих в окружающей среде в оптическом диапазоне спектра излучения, реализуется с помощью оптико-электронных комплексов.

Количественная мера оптического излучения определяется радиометрической цепочкой и потоком излучения. Радиометрическая схема измерения представляет собой последовательную цепь, которая состоит из исследуемого источника излучения, окружающей среды, в которой он находится, среды, через которую распространяется излучение, и соответствующей измерительной системы (рис. 1). Для того чтобы лучше понять возможности и предельные характеристики применительно к целям исследования и в сочетании с возможностями применяемых методов, необходимо последовательно рассмотреть различные звенья данной цепи, оценить их свойства и произвести измерения с использованием аппаратуры специально приспособленной для обнаружения искомого объектов.

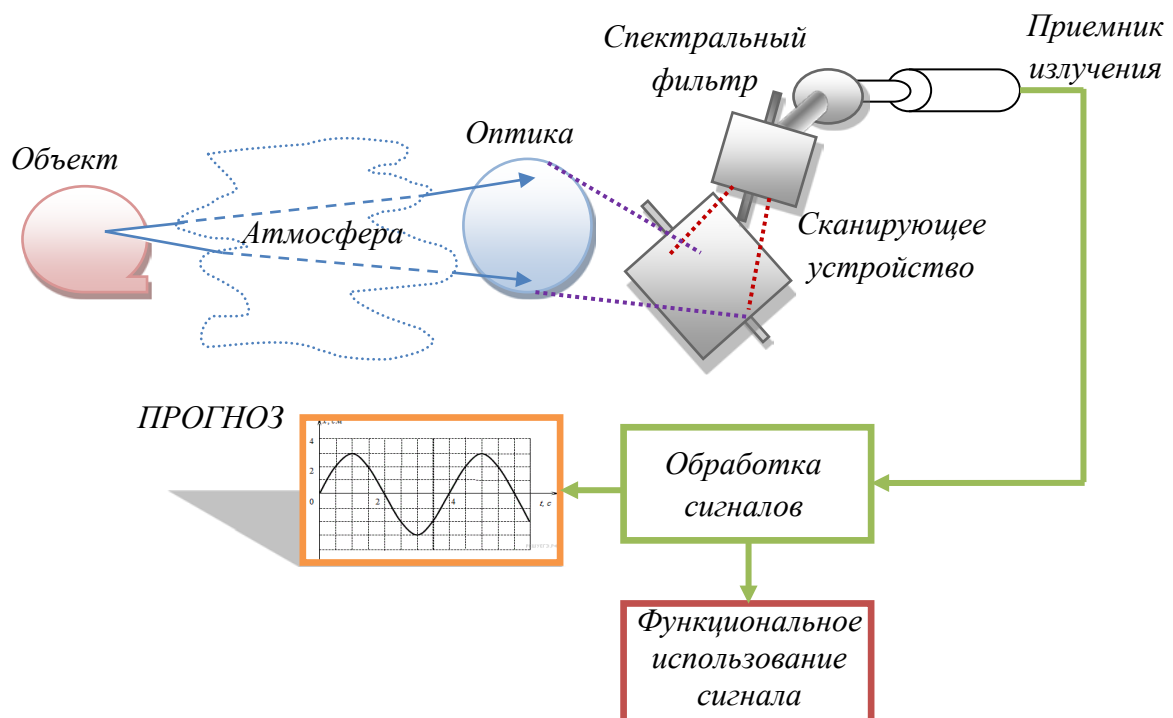


Рис. 1. Радиометрическая схема измерения оптического излучения

В каждом конкретном случае дистанционного обнаружения или измерения этих параметров следует обращаться к системе, обеспечивающей обработку информации в соответствии с конечной целью. Описываемая в проекте прогнозная функция системы может быть построена только по ее модельному представлению. И действительно, если $\{M_{OB}(g_i)\} \cap \{OB_{real}(g_i)\} = \max$, то модельное представление наиболее адекватно реальной системе, и тогда возможно построение прогнозной модели ее поведения на следующих этапах:

- замена реального объекта $\{OB_{real}(g_i)\}$ моделью – $\{M_{OB}(g_i)\}$ (рис. 2);
- имитационное моделирование (ИМ) $\{M_{OB}(g_i)\}$;
- физическое моделирование $\{OB_{real}(g_i)\}$.

Цель работы – разработка и исследование алгоритмов построения прогнозных многопараметрических моделей технических систем для реальных условий эксплуатации на основе апостериорных данных.

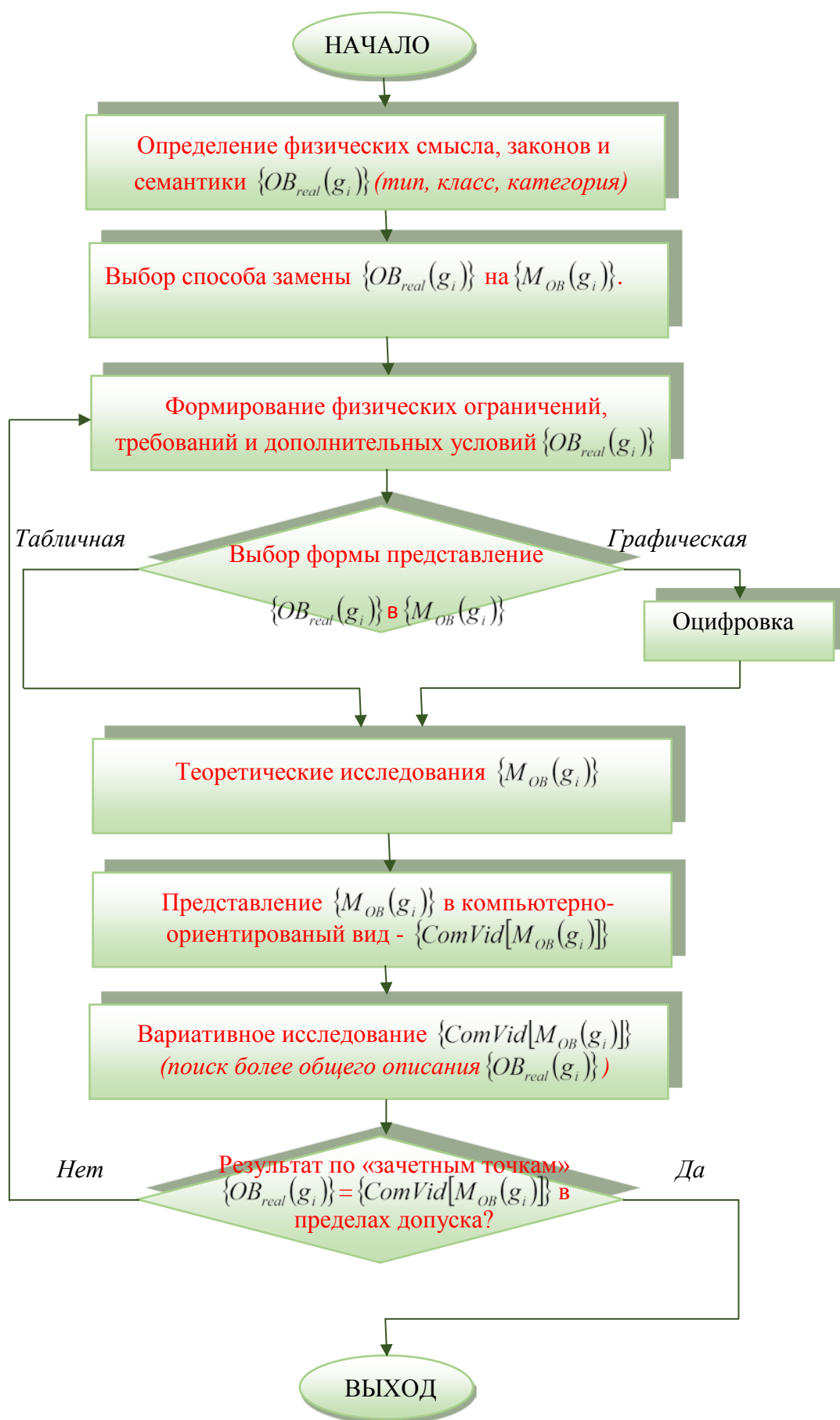


Рис. 2. Схема алгоритма построения прогнозной модели на этапе замены реального объекта моделью

Методы и предметы исследования включают в себя методы исследования аналитических моделей технических систем, методы имитационного моделирования, теорию алгоритмов, реализацию проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента, современные технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

- применение современной технологии математического моделирования технических систем со сложными законами функционирования на основе экспериментальных данных, с различной степенью детализации;
- принципы композиции и декомпозиции технических систем с неизвестными и сложными законами функционирования;
- анализ методов построения прогнозных аналитических моделей технических систем для реальных условий эксплуатации на основе апостериорной информации (данных);
- разработка алгоритмов построения аналитических моделей для прогнозирования состояния технических систем применительно к системам дистанционного зондирования поверхности Земли (ДЗЗ) на основе апостериорных данных;
- разработка алгоритмов и реализация проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Заключение

В исследовании получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- представлена классификация методов прогнозирования состояний технических систем и процессов;
- разработаны принципы композиции и декомпозиции технических систем со сложными законами функционирования на основе экспериментальных данных, с различной степенью детализации применительно к системам ДЗЗ;
- предложен метод построения прогнозных аналитических моделей технических систем для реальных условий эксплуатации на основе апостериорной информации (данных) применительно к системам ДЗЗ;
- разработан алгоритм построения аналитических моделей для прогнозирования состояния технических систем применительно к системам ДЗЗ на основе апостериорных данных;
- разработаны алгоритмы реализации проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;
- предложен метод оценки достаточности и достоверности полученных результатов.

Достоверность научных результатов и выводов определяется корректностью использования математического аппарата и подтверждается результатами компьютерного моделирования.

Результаты работы использованы компанией ООО «ЛОМО МЕТЕО» и внедрены в учебный процесс на кафедрах ИПМ и ОЦСиТ в Университете ИТМО.

Практическую ценность работы составляют алгоритмы, разработанные применительно к системам ДЗЗ:

- композиции и декомпозиции технических систем со сложными законами функционирования, полученные на основе экспериментальных данных с различной степенью детализации на автономные подсистемы с последующим созданием прогнозной модели всей системы или ее подсистем в реальном масштабе времени;
- построения прогнозных аналитических моделей технических систем для реальных условий эксплуатации на основе апостериорных данных;
- построения аналитических моделей для прогнозирования состояния технических систем на основе апостериорных данных;

– реализации проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

В настоящее время автором проводятся аналитические исследования, набирается база практических данных и планируется последующая работа с ними с целью создания единых редуцированных прогнозных функций физических динамических явлений. По результатам эксперимента разработан алгоритм обработки экспериментальных данных и рассмотрена их связь с теоретическими расчетами.

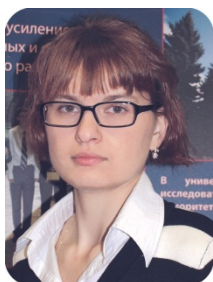
Публикации

1. *Демин А.В., Дмитриева С.П.* Применение методов математического моделирования при прогнозировании состояний технических систем. Учебное пособие. СПб., 2014. – 128 с.
2. *Демин А.В., Дмитриева С.П.* Применение методов математического моделирования при прогнозировании состояний технических систем. Сборник задач. СПб., 2014. – 58 с.
3. *Демин А.В., Дмитриева С.П.* Разработка алгоритмов построения прогнозных многопараметрических моделей физических явлений // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'14». Т. 3. М., 2014. С. 289–294.
4. *Дмитриева С.П.* Алгоритм построения прогнозных функций [Электронный ресурс] // Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития современного общества: материалы X международной научно-практической конференции. М., 2013. С. 9–13. URL: <http://www.gosnauka.ru/arhiv.php> (дата обращения: 28.12.2013).
5. *Дмитриева С.П.* Аналитический обзор: методология компьютерного моделирования [Электронный ресурс] // Тенденции и перспективы развития современного научного знания: материалы IX международной научно-практической конференции. М., 2013. С. 11–16. URL: <http://teoretika.com/arhiv.php> (дата обращения: 29.12.2013).
6. *Дмитриева С.П.* Аналитический обзор: основные принципы моделирования процессов [Электронный ресурс] // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: материалы X международной научно-практической конференции. М., 2013. С. 13–18. URL: <http://www.ruskonf.ru/arhiv.php> (дата обращения: 24.12.2013).
7. *Дмитриева С.П.* Алгоритм построения аналитических прогнозных функций на основе экспериментальных данных [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 288–289. URL: <http://kmu.ifmo.ru/file/stat/12/binder2.pdf> (дата обращения: 11.04.2014).
8. *Dmitrieva S.P.* Development of scientific forecasting: building predictive models [Electronic resource] // Science and Education: materials of the V international research and practice conference. Vol. 2. Munich, 2014. P. 180–185. URL: <http://www.euscience.de/ru/archive.php> (accessed: 28.02.2014).
9. *Dmitrieva S.P.* Development of scientific forecasting [Electronic resource] // Science, Technology and Higher Education: materials of the IV international research and practice conference. Vol. 2. Westwood, 2014. P. 302–307. URL: <http://science-canada.com/01-2014-2.pdf> (accessed: 30.01.2014).

Литература

1. *Зайцев В.Ф.* Математические модели в точных и гуманитарных науках. СПб., 2006. – 112 с.
2. *Демин А.В., Копорский Н.С.* Имитационное моделирование информационно-измерительных и управляющих систем. СПб., 2007. – 138 с.
3. *Демин А.В., Моисеева М.И.* Оценка достоверности представления экспериментальных данных аналитической зависимостью // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'11». Т. 1. М., 2010. С. 414–416.
4. *Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М., 2007. – 228 с.

5. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. М., 2007. – 192 с.
6. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М., 2001. – 320 с.
7. Bassett E.E., Bremner J.M., Morgan B.J.T. Statistics: Problems and Solutions. 2000. – 227 p.
8. Brown R.G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series. 2004. – 480 p.
9. Clive L.D. Principles of mathematical modeling. 2004. – 303 p.
10. Johnson R.A., Bhattacharyya G.K. Statistics: Principles and Methods. 2009. – 704 p.
11. Katkovnik V., Egiazarian K., Astola J. Local approximation techniques in signal and image processing. Bellingham, 2006. – 553 p.
12. Kauppinen J., Partanen J. Fourier transforms in spectroscopy. 2001. – 271 p.
13. Livingstone D. A practical guide to scientific data analysis. 2009. – 358 p.
14. Motulsky H.J., Christopoulos A. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide to curve fitting. San Diego, 2003. – 351 p.
15. Oldham K.B., Myland J.C., Spanier J. An Atlas of Functions: with Equator, the Atlas Function Calculator. NY, 2008. – 748 p.
16. Rosenthal J., Gilliam D.S. Mathematical systems theory in biology, communications, computation and finance. 2003. – 504 p.
17. Velten K. Mathematical Modeling and Simulation: Introduction for Scientists and Engineers. 2009. – 362 p.



Ежова Василиса Викторовна
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра прикладной и компьютерной оптики
E-mail: evv_foist@mail.ru

РАЗРАБОТКА ОСНОВ КОМПОЗИЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СХЕМЫ

В.В. Ежова

Научный руководитель – профессор В.А. Зверев

Цели работы – разработка основ композиции оптических систем различного назначения на основе двухкомпонентной схемы. В результате исследовательской работы был выполнен анализ абберационных свойств тонкого компонента.

В области первичных aberrаций влияние конструктивных параметров тонкой линзы на aberrационные свойства изображения определяется коэффициентами сферической aberrации (S_I), комы (S_{II}) и астигматизма (S_{III}) [1, 2, 4]:

$$S_I = (1 - V) P, \quad (1)$$

$$S_{II} = a_p P - (Va_p + V - 1) W, \quad (2)$$

$$S_{III} = \frac{a_p^2}{1 - V} P - 2 \frac{Va_p + V - 1}{1 - V} Wa_p + (Va_p + V - 1)^2, \quad (3)$$

где a_p – расстояние от тонкой линзы до центра входного зрачка системы, V – поперечное увеличение изображения, P и W – параметры тонкой линзы:

$$P = \frac{n(2+n)(1-V)}{(n-1)^2} \left[\alpha^2 - \frac{1+2n}{2+n}(1+V)\alpha + \frac{n}{2+n} \frac{1-V^3}{1-V} \right], \quad (4)$$

$$W = -\frac{(1+n)(1-V)}{n-1} \left(\alpha - \frac{n}{n+1}(1+V) \right). \quad (5)$$

где α – угол, образованный осевым парааксиальным лучом с оптической осью, n – показатель преломления материала линзы.

Тогда коэффициент S_I определяется:

$$S_I = \frac{n(1-V)^2}{(n-1)^2} \left[\frac{(4n-1)(1+V)^2}{4(2+n)} - nV \right]. \quad (6)$$

На рис. 1 представлены кривые зависимости $S_I = S_I(V)$ для трех значений показателя преломления материала линзы: $n_{21} = 1,5$; $n_{22} = 1,65$ и $n_{23} = 1,8$. Представленные на этом рисунке кривые касаются оси OV при $V_2 = 1^x$, пересекают ось при $1^x \leq V_3 \leq 1,9^x$ и $0,5^x \leq V_1 \leq 1^x$, причем в промежутке $V_1 \leq V \leq V_3$ значения коэффициента $S_I \leq 0$ [3].

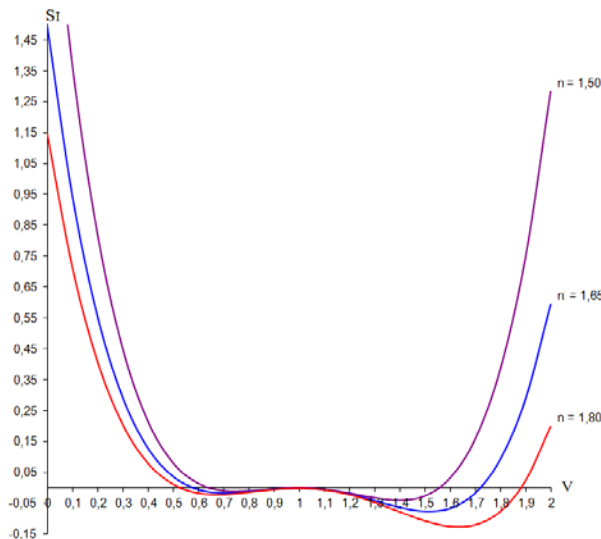


Рис. 1. Кривые зависимости $S_I = S_I(V)$

Рассмотрим оптическую систему, состоящую из k тонких линз. Сферическая абберация в данном случае определяется коэффициентом:

$$S_I = \frac{n}{(n-1)^3} \left[n - \frac{5}{16} \frac{(2n+1)^2}{n+2} \right].$$

Отсюда следует, что при $k = 2$, сферическая абберация третьего порядка отсутствует при $n = 2,5$ ($S_I = 0$). Пусть $k = 3$ в изображении точки, образованном оптической системой из трех тонких линз, сферическая абберация третьего порядка отсутствует при $n = 1,75$. При $k = 4$ задача коррекции первичной сферической абберации решается при $n = 1,5$ [3].

Для оптической системы, состоящей из k тонких линз, в результате преобразований получаем, что значение параметра W_k не зависит от числа линз в системе.

При $W = 0$:

$$S_I(W = 0) = \frac{n^3(1-V)^2}{(n^3-1)^2} \left[V^2 - \frac{n^2+1}{n}V + 1 \right]. \quad (7)$$

На рис. 2 представлены кривые зависимости $S_I(W=0) = S_I(V)$ для трех значений показателя преломления материала линзы: $n_{21} = 1,5$; $n_{22} = 1,65$ и $n_{23} = 1,8$ [3].

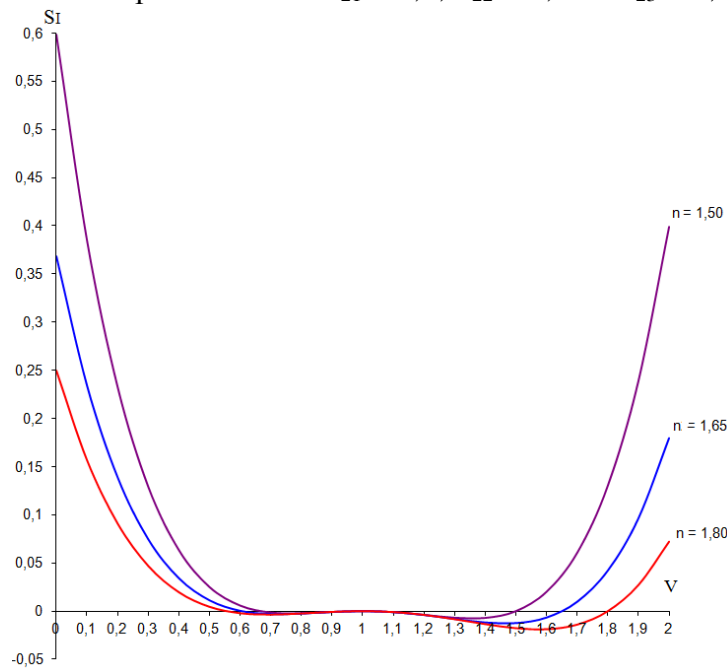


Рис. 2. Кривые зависимости $S_I(W=0) = S_I(V)$

Тогда получаем, что апланатическая коррекция первичных aberrаций в изображении, образованном трехлинзовой оптической системой достигается при $n = 1,828$. Таким образом, при апланатической коррекции первичных aberrаций показатель преломления материала линз должен быть заметно больше, чем при стигматической.

В общем случае при $W \neq 0$, $P \neq 0$ и $V = 0$ положение входного зрачка определяется выражением

$$a_p = \frac{(n^2 - 1)\alpha - n(n - 1)}{n(n + 2)\alpha^2 - n(2n + 1)\alpha + n^2}. \quad (8)$$

На рис. 3 представлены кривые зависимости $a_p = a_p(\alpha)$ при изменении угла α в интервале $-2 \leq \alpha \leq 2$ для трех значений показателей преломления: $n = 1,50$; $1,65$; $1,80$ [3].

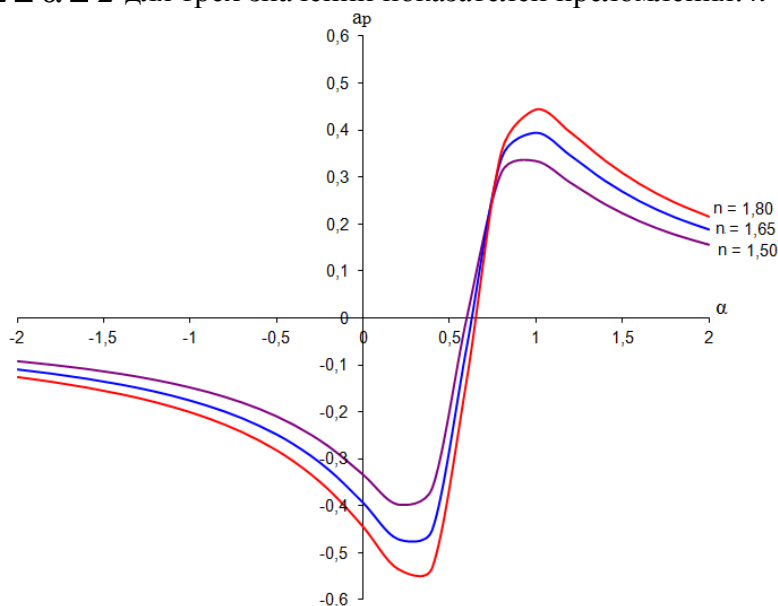


Рис. 3. Кривые зависимости $a_p = a_p(\alpha)$

При однозначном положении входного зрачка, когда в изображении отсутствует первичный астигматизм, отсутствует также и первичная кома.

Таким образом, существуют два значения величины отрезка a_p , при которых в изображении отсутствует первичный астигматизм. Входной зрачок, расположенный на меньшем по абсолютной величине расстоянии от линзы, профессор М.М. Русинов назвал ближним зрачком, а на большем – дальним [1, 3, 4].

На рис. 4 представлены кривые зависимости $a_p = a_p(\alpha)$ при $-n \leq \alpha \leq 0$ (рис. 4а) и при $n \leq \alpha \leq 2n$ (рис. 4б), где $n = 1,65$ [3].

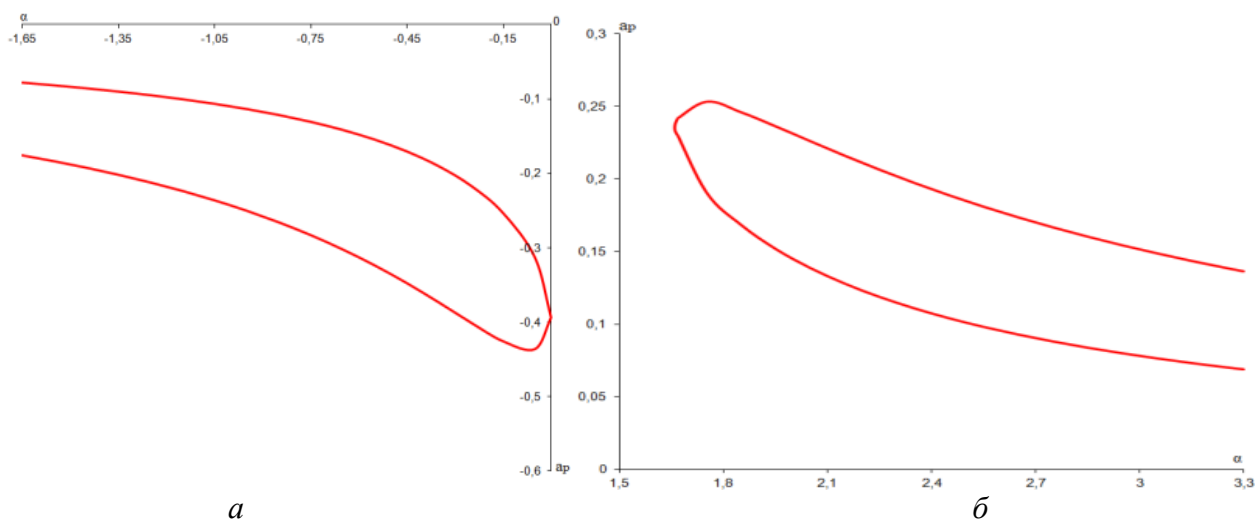


Рис. 4. Кривые зависимости $a_p = a_p(\alpha)$ при $n=1,65$

При изменении положения входного зрачка и при неизменном значении параметров P и W величина коэффициента S_{III} изменяется, то есть в общем случае $S_{III} = S_{III}(a_p) \neq 0$.

На рис. 5 представлены кривые зависимости $S_{III} = S_{III}(a_p)$ при постоянном показателе преломления ($n = 1,65$) и разных значениях угла ($\alpha = -2, 0, 2$) (рис. 5а), а также при постоянном значении угла ($\alpha = 0$) и при разных показателях преломления ($n = 1,5; 1,65; 1,8$) (рис. 5б) [3].

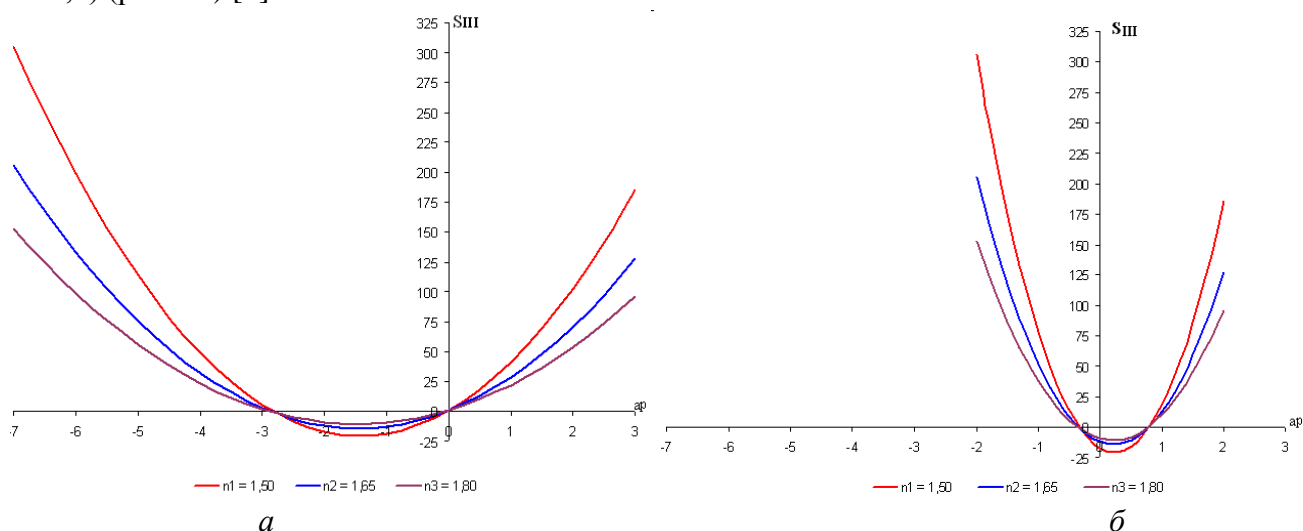


Рис. 5. Кривые зависимости $S_{III} = S_{III}(a_p)$.

Вторичный спектр или вторичная хроматическая aberrация положения может оказывать весьма заметное влияние на качество изображения оптических систем, работающих в широком спектральном диапазоне длин волн, особенно в системах

с большими фокусными расстояниями (объективы астрономических зрительных труб, объективы коллиматоров и т. д.) [1, 5, 6].

В оптической системе, состоящей из двух тонких компонентов, разделенных конечным воздушным промежутком, вполне возможна не только апланатическая, но и анастигматическая коррекция первичных aberrаций [6]. У такой системы исправлены сферическая aberrация, кома, астигматизм, хроматизм положения и хроматизм увеличения; а кривизна поверхности и вторичный спектр – не исправлены. Более того, в изображении, образованном двухкомпонентной системой телеобъектива или обратного телеобъектива, возможна и плананастигматическая коррекция aberrаций. У такой системы исправлены сферическая aberrация, кома, астигматизм, кривизна поверхности, хроматизм положения и хроматизм увеличения; а вторичный спектр не исправлен.

Хроматизм положения равен:

$$-\delta s'_{xpF'C'} = f'^2 \left(\frac{\varphi_1}{\mu_{e1}} + \frac{\varphi_2}{\mu_{e2}} \right) = \frac{\varphi_1}{\mu_{e1}} + \frac{\varphi_2}{\mu_{e2}},$$

где f' – фокусное расстояние системы, φ_1, φ_2 – оптические силы компонентов, $\mu_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_C}$ – коэффициент дисперсии (или число Аббе).

При $\delta s'_{xpF'C'} = 0$ оптические силы компонентов определяются:

$$\varphi_1 = \frac{\mu_{e1}}{\mu_{e1} - \mu_{e2}}, \quad (9)$$

$$\varphi_2 = -\frac{\mu_{e2}}{\mu_{e1} - \mu_{e2}}. \quad (10)$$

Обозначим $\mu^* = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_e}$, тогда

$$-\delta s'_{xpF'e} = \frac{\varphi_1}{\mu_{e1}^*} + \frac{\varphi_2}{\mu_{e2}^*}. \quad (11)$$

Учитывая соотношения (9) и (10), выражение (11) представим в виде:

$$-\delta s'_{xpF'e} = \frac{1}{\mu_{e1} - \mu_{e2}} \left(\frac{\mu_{e1}}{\mu_{e1}^*} - \frac{\mu_{e2}}{\mu_{e2}^*} \right). \quad (12)$$

Относительная частная дисперсия $p_{F'e} = \frac{\mu_e}{\mu_e^*}$ [6]. Выполнив соответствующую замену величин в выражении (12), получаем:

$$-\delta s'_{xpF'e} = \frac{p_{F'e1} - p_{F'e2}}{\mu_{e1} - \mu_{e2}}. \quad (13)$$

Пусть первый компонент – тонкая одиночная линза в воздухе, а второй – состоит из двух тонких линз. При этом:

$$\frac{\varphi_{22}}{\varphi_{21}} = -\frac{\mu_{e22} p_{F'e1} - p_{F'e21}}{\mu_{e21} p_{F'e1} - p_{F'e22}}. \quad (14)$$

Для обычных стекол соотношение (14) можно преобразовать к виду:

$$\frac{\varphi_{22}}{\varphi_{21}} = -\frac{\mu_{e22} \mu_{e1} - \mu_{e21}}{\mu_{e21} \mu_{e1} - \mu_{e22}}. \quad (15)$$

Пусть первый компонент состоит из двух тонких линз, а второй – тонкая одиночная линза в воздухе. Тогда получаем:

$$\frac{\Phi_{12}}{\Phi_{11}} = -\frac{\mu_{e12} P_{F'e2} - P_{F'e11}}{\mu_{e11} P_{F'e2} - P_{F'e12}},$$

$$\frac{\Phi_{12}}{\Phi_{11}} = -\frac{\mu_{e12} \mu_{e2} - \mu_{e11}}{\mu_{e11} \mu_{e2} - \mu_{e12}}.$$

Заключение

Показана возможность и определены условия не только стигматической, но и апланатической коррекции aberrаций третьего порядка в изображении, образованном системой положительных линз. В результате исследовательской работы были получены соотношения, определяющие положения входного зрачка тонкой линзы, при которых в образованном изображении отсутствуют первичная кома и астигматизм. Были получены соотношения, определяющие выбор марок стекол линз оптической системы из двух тонких компонентов, разделенных конечным воздушным промежутком и обладающих требуемыми значениями средней дисперсии и относительной частной дисперсии из условия апохроматической коррекции aberrаций.

Публикации

1. Ежова В.В. Анализ принципиальных схем оптической системы объектива // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2012. С. 56–57.
2. Ежова В.В., Зверев В.А. Абберационный анализ двухкомпонентной схемы оптической системы объектива // Оптический журнал. 2012. Вып. 12. Т. 79. С. 23–29.
3. Ежова В.В., Зверев В.А., Точилина Т.В. Абберационный анализ композиции тонкого оптического компонента с концентрическим мениском // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 6–12.
4. Ежова В.В. Апохроматическая коррекция aberrаций оптической системы из двух тонких компонентов // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб., 2014. С. 135–137.
5. Ezhova V., Zverev V., Ezhova K. Aberration properties of thin lenses and composition of optical systems // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9131. P. 91311W1–91311W11.
6. Ежова В.В., Зверев В.А., Тимощук И.Н. Абберационные свойства тонкой линзы в широких и узких пучках лучей // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 5. С. 51–60.

Литература

1. Зверев В.А. Основы геометрической оптики. Учебное пособие. СПб., 2002. – 218 с.
2. Зверев В.А., Точилина Т.В. Основы оптотехники. Учебное пособие. СПб., 2005. – 293 с.
3. Зверев В.А., Тимощук И.Н. Абберационные свойства тонкой линзы как элемента композиции оптической системы // Оптический журнал. 2010. Вып. 4. Т. 77. С. 10–16.
4. Русинов М.М. Композиция оптических систем. СПб., 2011. – 382 с.
5. Слюсарев Г.Г. Расчёт оптических систем. Л., 1975. – 640 с.
6. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л., 1968. – 312 с.



Иванов Сергей Александрович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптоинформационных технологий и материалов
E-mail: ykkapoh@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ЛАЗЕРНЫХ СВОЙСТВ ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНЫХ СТЕКОЛ АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

С.А. Иванов

Научный руководитель – профессор Н.В. Никоноров

Введение

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла являются перспективным материалом для создания объемных амплитудно-фазовых голограмм. Эти стекла производят компании Corning (США), Optigrate (США), PD-LD (США) и НИИ нанофотоники и оптоинформатики Университета ИТМО (Россия). На основе коммерчески выпускаемых (классических) ФТР-стекло изготавливаются разнообразные голографические дифракционные оптические элементы: спектральные и пространственные селекторы; сверхузкополосные фильтры; внутрирезонаторные брэгговские зеркала для повышения спектральной яркости и термической стабилизации длины волны полупроводниковых лазеров; брэгговские чипированные решетки для компрессии световых импульсов; сумматоры мощных лазерных пучков и т. д. В настоящее время эти элементы эффективно используются в лазерной технике, оптической связи, системах записи, хранения и обработки информации, технике локации и навигации.

Классические ФТР-стекла и оптические элементы на их основе имеют следующие достоинства:

- высокий прирост показателя преломления ($\Delta n \sim 5 \times 10^{-4}$);
- высокую дифракционную эффективность ($> 99\%$);
- большую толщину голограммы (несколько миллиметров), что позволяет создавать сверхузкополосные спектральные (полуширина $\sim 0,1$ нм) и пространственные (0,8 мрад) фильтры;
- неограниченный срок хранения голограммы (десятки лет);
- высокую термическую, механическую и оптическую прочность (эти характеристики близки к промышленному оптическому стеклу К8).

ФТР-стекло – это многокомпонентный материал, в состав которого, помимо стеклообразователя в виде силикатов и модификаторов, входят разнообразные добавки:

- трехвалентный церий, который является донором фотоэлектронов и определяет фоточувствительность материала;
- ионы серебра, сурьмы и олова, которые сначала играют роль акцепторов электронов, то есть перехватывают фотоэлектроны с церия, а затем, при последующей термообработке, играют роль доноров, «сбрасывая» электроны на ионы серебра с дальнейшим их восстановлением и образованием коллоидных частиц;
- галогениды – фториды и бромиды, которые участвуют в формировании кристаллической фазы.

Благодаря последним исследованиям, проводимым с целью уменьшения наведенных оптических потерь в видимой области спектра, обусловленных полосой поглощения коллоидных наночастиц серебра в сине-зеленой области спектра, был модифицирован классический состав ФТР-стекла путем оптимизации концентрации галогенидов (фторидов и бромидов) и ионов сурьмы. Ионы сурьмы играют ключевую роль в захвате и сбросе

фотоэлектронов при облучении и последующей термообработке ФТР-стекла. Также была понижена концентрация примесных ионов, способных к захвату фотоэлектронов. Было продемонстрировано, что голограммы на модифицированном ФТР-стекле не имеют дополнительной полосы поглощения в сине-зеленой области спектра, обусловленной поглощением на металлических наночастицах серебра ($\lambda_{\max} = 450$ нм), как это имеет место в случае классического ФТР-стекла, коэффициент наведенного поглощения в котором достигает $3,5 \text{ см}^{-1}$. Это позволяет записывать чисто фазовые голограммы на ФТР-стекле, которые могут работать в широком спектральном диапазоне. Помимо высокой прозрачности в коротковолновом диапазоне, голограммы на модифицированном ФТР-стекле имеют прирост показателя преломления в два раза больший ($\Delta n \sim 10^{-3}$), чем у классического образца. Более того, максимальный прирост показателя преломления ($\Delta n = 10,2 \times 10^{-4}$) для модифицированного ФТР-стекла достигается при экспозициях в семь раз ниже, чем у его классического состава ($\Delta n = 4,5 \times 10^{-4}$).

Высокие значения прироста показателя преломления для объемной среды и последние модификации состава ФТР-стекла открывают новые возможности по использованию этого материала. Его матрица позволяет вводить в систему сочетания эрбия, иттербия, неодима, а также другие редкоземельные ионы в концентрациях достаточных для получения активной лазерной среды на ФТР-стекле. Однако исследования лазерных и оптических свойств этого материала после легирования редкоземельными ионами не проводилось.

Целью проекта является создание наностеклокерамики способной к записи голограмм и лазерной генерации.

В задачи исследования входит:

- анализ влияния редкоземельных активаторов на светочувствительность материала;
- исследование влияние различных концентраций редкой земли на голографические характеристики материала;
- оптимизация содержания редкоземельных ионов;
- исследование влияния голограмм на лазерные свойства материала;
- получение генерации на данном материале.

Основные достигнутые результаты

Из анализа спектров поглощения и люминесценции до и после процесса фото-термо-индуцированной кристаллизации образцов, содержащих редкую землю, следует, что редкоземельные ионы не входят в кристаллическую фазу, образующуюся в результате процесса термообработки.

Для подтверждения этого вывода был сделан расчет размеров элементарной ячейки для активированных и неактивированных стекол. В обоих случаях он был одинаков и составил $4,9 \text{ \AA}$. Это говорит о том, что ионы редкой земли не входят в кристаллическую фазу, так как иначе должен был бы измениться размер элементарной ячейки из-за различий в ионных радиусах элементов.

Видно, что добавление редкой земли в состав стекла негативно сказывается на кинетике его кристаллизации. Амплитуда модуляции первой гармоники показателя преломления в стекле, содержащем редкоземельные ионы ниже, чем в реперном составе ФТР-стекла при одинаковых временах экспозиции. Конечная светочувствительность стекла снижается с увеличением концентрации редкой земли, то есть для достижения значений дифракционной эффективности аналогичной реперному составу необходимо увеличение времени термообработки в 4–8 раз в зависимости от концентрации ионов редкой земли. При концентрации редкой земли в 12 вес % дифракционная эффективность снижается в два раза, а время термообработки увеличивается в 10 раз.

Проведены комплексные измерения спектрально-люминесцентных и лазерных свойств ФТР-стекло, активированных эрбием и иттербием, а также прямые измерения населенности метастабильного уровня эрбия (${}^4I_{13/2}$) в зависимости от концентрации ионов эрбия ($0,26\text{--}2,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$) и мощности лазерной накачки ($50\text{--}590$ мВт). Увеличение концентрации ионов Er^{3+}

приводит к уменьшению населенности метастабильного уровня и коэффициента усиления, что связано с нелинейным ап-конверсионным тушением.

Для образца с минимальным содержанием ионов эрбия ($NEr=0,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$) достигнута инверсия населенности 52 % при мощности накачки 590 мВт. Коэффициент усиления при таких условиях составил $0,014 \text{ см}^{-1}$ для образца толщиной $\sim 1 \text{ мм}$.

Показано, что спектрально-люминесцентные и лазерные характеристики полифункционального материала (лазерного ФТР-стекла) сопоставимы с традиционными монофункциональными аналогами (лазерными бариевофосфатными стеклами). Коэффициент усиления бариевофосфатных стекол $0,05 \text{ см}^{-1}$, ФТР-стекла – $0,014 \text{ см}^{-1}$.

В ходе выполнения работы также была создана методика записи отражательных голограмм высокой эффективной толщины. Она позволяет записывать Брэгговские зеркала в объеме на толщину, необходимую для достижения максимальной дифракционной эффективности на расчетной длине волны, а также получать однородные отражательные решетки толщиной до 10 мм. На рис. 1 изображена дифракция на голографической решетке при работе на пропускание. Решетка записана по всему образцу с размерами $10 \times 10 \times 6 \text{ мм}$. При считывании с торца эффективная толщина голограммы составляет 10 мм.

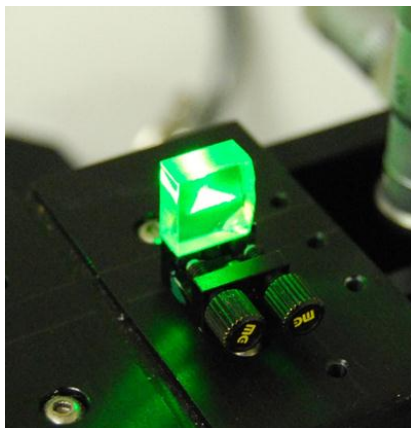


Рис. 1. Дифракция на голографической объемной решетке

В процессе работы также была усовершенствована методика анализа параметров голографических решеток, позволяющая оценивать дифракционную эффективность, амплитуду модуляции, показатель преломления, угловую и спектральную селективность отражательных голограмм.

Публикации

1. *Ivanov S.A., Aseev V.A.* Resonator free Er-Yb laser based on photo-thermo-refractive (PTR) glass // *Proceedings of SPIE*. 2014. Vol. 8959. P. 89591E-1–89591E-7.
2. *Ангервакс А.Е., Васильев В.Н., Иванов С.А., Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Щеулин А.С.* Новые сверхглубокие голографические среды и их применение в фотонике // *Радиооптические технологии в приборостроении: сборник материалов научно-технической конференции*. Небуг, Краснодарский край, 2014. С. 238–246.



Иванова Алена Евгеньевна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: newiva@mail.ru

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

А.Е. Иванова

Научный руководитель – профессор С.А. Козлов

Цели работы – разработка и исследование высокоскоростного квантового генератора случайных чисел, использующего в качестве источника случайности флуктуации вакуума. Такой генератор позволяет получать истинно случайные числа, которые могут использоваться в приложениях, где необходима высокая степень случайности.

Для физических генераторов случайных чисел могут использоваться шумы от резисторов, диодов, в оптических реализациях наиболее часто применяются флуктуации фазового шума лазеров. В соответствии с законами классической физики все эти источники шума определяются вполне детерминированной динамикой, соответственно они не являются истинно случайными.

В квантовых явлениях результат измерений подчиняется вероятностным законам: статистические свойства измерений могут быть предсказаны, но результат каждого измерения является абсолютно случайным. Несмотря на безусловную случайность, многие существующие на данный момент реализации схемы квантовой генерации случайных чисел все же обладают существенными недостатками, такими как недостаточная степень случайности, сложность в реализации и настройке схемы, низкая скорость генерации случайных чисел, относительно высокая стоимость.

Существуют разные способы реализации квантовых генераторов случайных чисел: основанные на разделении пучка [1, 2], на запутанных состояниях фотонов [3, 4], на процессах испускания и детектирования фотонов [5, 6, 7], на квантовом шуме лазеров [8, 9]. Альтернативным подходом является использование вакуумных флуктуаций электромагнитного поля [10].

Истинно случайные числа, получаемые при помощи квантовых генераторов случайных чисел необходимы для многих приложений, требующих более высокого качества случайных последовательностей, включая криптографию как классическую, так и квантовую. Например, в протоколах квантовой криптографии [11] начальный выбор базиса должен быть истинно случайным. Случайные числа также могут использоваться для статистических исследований; реализации алгоритмов, включающих случайности; вычислительных методов; лотерей и игр.

Данная работа посвящена созданию высокоскоростного генератора случайных чисел, основанного на использовании вакуумных флуктуаций электромагнитного поля. Особенностью разработанных схем является извлечение случайности из квантового шума.

Процесс генерации осуществляется следующим образом: на один вход светоделителя подается лазерное излучение, а на другой – вакуум. В светоделителе происходит взаимодействие между сильным лазерным сигналом и флуктуациями вакуума. Далее выполняется обработка разностного сигнала, полученного на балансном детекторе с выходов светоделителя, как физическая, так и компьютерная, итогом которой является получение последовательностей случайных чисел. Схема квантового генератора случайных чисел, работающего по такому принципу, приведена на рис. 1.

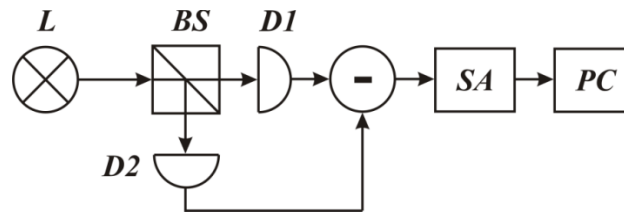


Рис. 1. Схема квантового генератора случайных чисел, основанного на принципах гомодинного детектирования флуктуаций вакуума: L – лазер, BS – светоделитель, SA – спектроанализатор, D1 и D2 – детекторы, PC – компьютер

Практическая реализация любого генератора случайных чисел отличается по характеристикам от его теоретического описания. Следовательно, важным является моделирование влияния любых возможных сбоев и изучение их воздействия на статистические характеристики получаемых результатов. Для обработки данных, получаемых при прохождении сигнала через светоделитель и последующем его детектировании, а также для выбора необходимых параметров экспериментальной установки необходимо выявить взаимосвязь между падающим на светоделитель лазерным излучением и получаемым с детекторов разностным током при различных возможных параметрах светоделителя и приемного устройства.

Математическое описание этой взаимосвязи получим следующим образом. На один вход светоделителя подается когерентное состояние, а на другой – вакуум. В светоделителе происходит взаимодействие между сильным лазерным сигналом и флуктуациями вакуума (рис. 2).

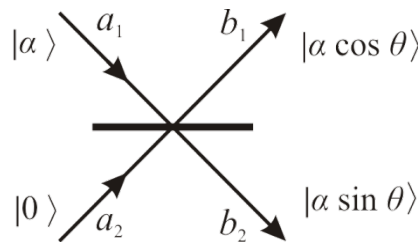


Рис. 2. Схема работы светоделителя с углом θ , на входы которого подаются когерентное состояние и вакуум

При использовании симметричного светоделителя и детекторов с одинаковой квантовой эффективностью среднее значение разностного тока становится равным нулю, а амплитуда отклонения разностного тока прямо пропорциональна интенсивности падающего на светоделитель лазерного излучения.

Амплитуда отклонения разностного тока δi выражается формулой:

$$\delta i = \alpha \sqrt{\gamma_2^2 \sin^2 \theta + \gamma_1^2 \cos^2 \theta}, \quad (1)$$

где θ – угол светоделителя, γ_1, γ_2 – квантовая эффективность детекторов, α – параметр распределения Пуассона, описывающего лазерное излучение.

Зависимость относительного отклонения разностного тока от отклонений параметров детекторов и светоделителя принимает вид:

$$\frac{\Delta(\delta i)}{(\delta i)_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\gamma_1 + \Delta\gamma_2}{\gamma} + \frac{\Delta\gamma_1^2 + \Delta\gamma_2^2}{2\gamma^2} + \sin(2\Delta\theta) \left(\frac{\Delta\gamma_2 - \Delta\gamma_1}{\gamma} + \frac{\Delta\gamma_2^2 - \Delta\gamma_1^2}{2\gamma^2} \right) \right), \quad (2)$$

где $\gamma_1 = \gamma + \Delta\gamma_1, \gamma_2 = \gamma + \Delta\gamma_1$ – квантовая эффективность детекторов, $\theta = \pi/4 + \Delta\theta$ – угол светоделителя.

При использовании несимметричного светоделителя и детекторов с различным значением квантовой эффективности зависимость относительного отклонения разностного

тока от отклонений параметров детекторов и светоделителя может быть вычислена по формуле (2).

Таким образом, получены выражения, описывающие взаимосвязь между падающим на светоделитель излучением и регистрируемым разностным током при гомодинном детектировании. Найдены соотношения, позволяющие оценить влияние неидеальности элементов схемы квантовой генерации случайных чисел, использующей вакуумные флуктуации, на результаты измерений.

Исследуем возможности применения оптического разветвителя для систем квантовой генерации случайных чисел, основанных на флуктуациях вакуума.

В большинстве таких систем, использующих гомодинное детектирование, используется светоделитель с двумя входными и двумя выходными портами. Были проведены теоретические исследования, доказывающие эквивалентность математического описания работы подобного светоделителя и оптического разветвителя с одним входным и двумя выходными портами.

Для описания воздействия разветвителя на сигнал при помощи матрицы представим распространение сигнала в нем при помощи трех входных и трех выходных сигналов, как показано на рис. 3.

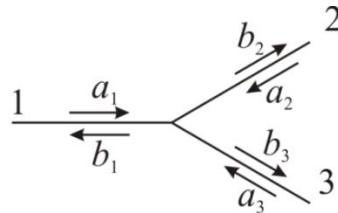


Рис. 3. Схема работы оптического разветвителя: 1 – входной порт; 2 и 3 – выходные порты; a_1, a_2, a_3 – сигналы, поступающие в разветвитель по первому, второму и третьему портам соответственно; b_1, b_2, b_3 – сигналы, исходящие из соответствующих портов светоделителя

Взаимосвязь между сигналами на входах и выходах разветвителя можно описать при помощи следующего выражения:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sqrt{1-2\alpha^2} & \beta & \beta \\ \alpha & -\gamma & \sqrt{1-\beta^2-\gamma^2} \\ \alpha & \sqrt{1-\beta^2-\gamma^2} & -\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Матрица, характеризующая воздействие разветвителя на сигнал, является унитарной.

Если сигнал поступает на первый вход разветвителя, то на обоих выходах получим сигнал с одинаковым коэффициентом пропорциональности α . Часть сигнала отражается обратно, с коэффициентом пропорциональности $-\sqrt{1-2\alpha^2}$, удовлетворяющим условиям нормировки.

Если сигнал поступает на вход второго порта, то на первый вход перекачается часть сигнала с коэффициентом пропорциональности β , а часть его отразится обратно с коэффициентом пропорциональности $-\gamma$. На выход третьего порта поступит сигнал с коэффициентом пропорциональности $\sqrt{1-\beta^2-\gamma^2}$, удовлетворяющим условиям нормировки. Аналогично будет происходить распространение сигнала при его подаче на вход третьего порта.

Применив условия нормировки, можно выразить параметры α и β через γ :

$$\alpha = \beta = \pm\sqrt{2\gamma(1-\gamma)} \quad (4)$$

Если $-\sqrt{1-2\alpha^2} = 0$, то есть сигнал распределяется равномерно между выходными портами 2 и 3, тогда $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$. В этом случае, используя выражение (4), можно получить значения $\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}$ и $\gamma = \frac{1}{2}$.

Если подавать сигнал a_1 на первый порт разветвителя, то сигналы с выходов 2 и 3 можно получить при помощи описанной выше матрицы (3).

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} a_1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} a_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Таким образом, $b_2 = b_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} a_1$, что совпадает с величиной сигнала, получаемого на

выходных портах симметричного светоделителя, на один вход которого поступают колебания вакуума, а на другой – сигнал a_1 . Следовательно математическое описание работы светоделителя с двумя входными и двумя выходными портами идентично описанию работы оптического разветвителя с одним входным и двумя выходными портами.

Полученные выражения доказывают возможность использования оптического разветвителя в экспериментальной установке по квантовой генерации случайных чисел, основанной на квантовых флуктуациях вакуума, а также использование для расчета подобных систем формул, полученных ранее для светоделителя с двумя входами и двумя выходами.

Заключение

Полученное в процессе выполнения данной работы математическое описание зависимости между излучением, падающим на светоделитель и разностным током на детекторах можно использовать при вычислении соотношения между интенсивностью излучения источника и квантовыми эффективностями детекторов.

Теоретические исследования, доказывающие эквивалентность математического описания работы оптического светоделителя с двумя входными и двумя выходными портам оптическому разветвителю, позволяют его использовать в экспериментальной установке по квантовой генерации случайных чисел, основанной на квантовых флуктуациях вакуума.

Преимуществами схем квантовой генерации случайных чисел, основанных на флуктуациях вакуума, являются простота реализации, высокая скорость генерации, низкая по сравнению с аналогами себестоимость, высокая степень случайности получаемых последовательностей.

Случайные числа, получаемые при помощи подобных квантовых генераторов, могут использоваться для приложений, требующих более высокого качества случайных последовательностей, чем у алгоритмических генераторов псевдослучайных чисел, в том числе для безопасности персональной идентификации или для криптографии.

Публикации

1. *Ivanova A.E., Chivilikhin S.A., Miroshnichenko G.P., Egorov V.I., Gleim A.V.* How scatter of the experimental parameters affects the statistical characteristics of a quantum random-number generator // *Journal of Optical Technology*. 2014. Vol. 81. No 8. P. 427–430.

2. Иванова А.Е., Чивилихин С.А., Мирошниченко Г.П., Егоров В.И., Глейм А.В. Влияние разброса параметров эксперимента на статистические характеристики квантового генератора случайных чисел // Оптический журнал. 2014. Вып. 8. Т. 81. С. 10–13.
3. Ivanova A.E., Chivilikhin S.A., Egorov V.I., Gleim A.V. Investigation of device imperfection influence on measurement results in beamsplitter-based quantum random number generation schemes // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 541. P. 012059.
4. Ivanova A.E., Egorov V.I., Chivilikhin S.A., Gleim A.V. Investigation of quantum random number generation based on space-time division of photons // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2013. Vol. 4. No 4. P. 550–554.
5. Иванова А.Е. Исследование статистики квантовой генерации случайных чисел, основанной на разделении отсчётов по времени // Альманах научных работ молодых ученых. СПб., 2013. С. 124–126.
6. Иванова А.Е., Глейм А.В., Егоров В.И. Исследование квантовой генерации случайных чисел, основанной на пространственно-временном разделении фотонов // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 154–155.

Литература

1. Jennewein T., Achleitner U., Weihs G., Weinfurter H., Zeilinger A. A fast and compact quantum random number generator // Review of Scientific Instruments. 2000. Vol. 71. No 4. P. 1675–1680.
2. Stefanov A., Gisin N., Guinnard O., Guinnard L., Zbinden H. Optical quantum random number generator // Journal of Modern Optics. 2000. Vol. 47. No 4. P. 595–598.
3. Fiorentino M., Santori C., Spillane S.M., Beausoleil R.G., Munro W.J. Secure self-calibrating quantum random bit generator // Physical Review A. 2007. Vol. 75. No 3. P. 032334.
4. Kwon O., Cho Y.-W., Kim Y.-H. Quantum random number generator using photon-number path entanglement // Applied Optics. 2009. Vol. 48. No 9. P. 1774–1778.
5. Stipčević M., Rogina M.B. Quantum random number generator based on photonic emission in semiconductors // Review of Scientific Instruments. 2007. Vol. 78. No 4. P. 045104.
6. Dynes J.F., Yuan Z.L., Sharpe A.W., Shields A.J. A high speed, postprocessing free, quantum random number generator // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 93. No 3. P. 031109.
7. Furst M., Weier H., Nauerth S., Marangon D.G., Kurtsiefer C., Weinfurter H. High speed optical quantum random number generation // Optics Express. 2010. Vol. 18. No 12. P. 13029–13037.
8. Qi Bing, Chi Yue-Meng, Lo Hoi-Kwong, Qian Li High-speed quantum random number generation by measuring phase noise of a single-mode laser // Optics Letters. 2010. Vol. 35. No 3. P. 312–314.
9. Reidler I., Aviad Y., Rosenbluh M., Kanter I. Ultrahigh-speed random number generation based on a chaotic semiconductor laser // Physical Review Letters. 2009. Vol. 103. No 2. P. 024102–024500.
10. Shen Y., Tian L., Zou H. Practical quantum random number generator based on measuring the shot noise of vacuum states // Physical Review A. 2010. Vol. 81. No 6. P. 063814.
11. Scarani V., Bechmann-Pasquinucci H., Cerf N.J. et al The security of practical quantum key distribution // Reviews of Modern Physics. 2009. Vol. 81. No 3. P.1301–1350.



Исаев Александр Сергеевич
Институт комплексного военного образования
Кафедра мониторинга и прогнозирования информационных угроз
E-mail: a.s.isaev@yandex.ru

МЕТОД И МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОСТРОЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

А.С. Исаев

Научный руководитель – доцент Г.П. Жигулин

Целью научно-технического исследования является существенное увеличение эффективности применяемых организационных и технических мер защиты информации за счет использования метода управления информационной безопасностью (ИБ) в организации на основе теории построения экспертных систем.

Поставленная цель научно-технического исследования достигалась поэтапным решением следующих задач.

1. Анализ действующих международных и Российских нормативно-правовых документов с целью выявления и систематизации общих требований, предъявляемых к СЗИ.
2. Исследование процессной составляющей управления ИБ в организациях.
3. Разработка метода управления ИБ на основе теории построения экспертных систем.
4. Разработка модели взаимодействия данных при осуществлении управления ИБ.
5. Разработка программных модулей реализации метода управления ИБ на основе теории построения экспертных систем.

В рамках выполнения первой задачи исследования были проанализированы действующие международные и Российские нормативно-правовые документы [1, 2, 3] с целью выявления и систематизации требований, предъявляемых к системам защиты информации (СЗИ). По результатам исследования были выявлены основные сопутствующие недостатки стандартного подхода реализации СЗИ, заключающиеся в отсутствии:

- единой подсистемы управления;
- обратной связи от системы защиты информации;
- средств автоматизации при реализации организационных мер защиты;
- аналитической составляющей процессов развития и обеспечения СЗИ.

В рамках выполнения второй задачи по исследованию процессной составляющей управления ИБ и дальнейшего анализа нормативно-правовой документации были выявлены основные процессные составляющие обеспечения ИБ, правильное управление которыми способно кардинально изменить направление развития СЗИ и позволить существенно увеличить ее эффективность. К таким направлениям относятся управления:

- активами организации;
- ресурсами СЗИ, реализованной в организации;
- рисками и угрозами информационной безопасности;
- документацией и информационно-справочной системой в организации;
- аудитом и анализом эффективности СЗИ;
- задачами и деятельностью сотрудников, осуществляющих процессы обеспечения ИБ в организации;
- процессами обеспечения непрерывности работы информационных систем и информационно-телекоммуникационных сервисов;
- процессами обеспечения мониторинга, выявления и реагирования на события ИБ;
- процессами обеспечения ИБ на различных этапах развития информационных систем, а также поддержание и продление жизненных циклов информационных систем организации;

- процессами обеспечения ИБ при осуществлении работы с сотрудниками организации, повышение их квалификации и общей компетенции по вопросам ИБ;
- процессами обеспечения ИБ при осуществлении информационного обмена и взаимодействия с третьими сторонами;
- процессами обеспечения разграничения прав доступа к информации и информационным системам пользователей организации, а также последующий контроль данного процесса.

Таким образом, полный перечень рассмотренных и описанных выше процессов подлежит соответствующему разбиению на основные функциональные группы, исходя из их роли в рамках процессов обеспечения ИБ.

1. Группа формирования требований и исходной информации к СЗИ и объектам защиты.

2. Группа систематизации информации по СЗИ и объектам защиты.

3. Группа актуализации информации по СЗИ и объектам защиты.

4. Группа аналитической обработки, контроля и анализа эффективности реализации механизмов защиты, действующих в рамках СЗИ.

5. Группа принятия решений по управлению ИБ и применению корректирующих и предупреждающих воздействий в сочетании с планированием и совершенствованием механизмов защиты, действующих в рамках СЗИ.

Каждая из данных функциональных групп может быть представлена в виде одной из составных частей в структуре экспертной системы, отвечающей за конкретные действия в рамках данного метода управления ИБ. Если провести аналогию процессов управления ИБ и структурой экспертной системы, отодвинув на второй план вопросы автоматизации самих процессов, мы получим полноправную экспертную систему, отвечающую за реализацию конкретного процесса в рамках организации.

Группа формирования требований и исходной информации к СЗИ и объектам защиты предназначена для систематизации требований внешней и внутренней нормативно-правовой документации в области обеспечения ИБ в организации и должна обеспечивать формирование исходного набора информации по всем объектам защиты и механизмам СЗИ в привязке к возникающим нормативным требованиям. В рамках реализации функционального назначения данной группы процессов с учетом положений теории построения экспертных систем для детального формирования требований и исходной информации для смежных процессов должна быть привлечена группа экспертов в области обеспечения ИБ. Данная функциональная группа призвана обеспечить формализацию и определить классификаторы по формируемым исходным данным для последующей их систематизации в рамках системы управления ИБ в организации. С точки зрения положений теории построения экспертных систем данная функциональная группа будет являться «Базой знаний».

Группа систематизации информации по СЗИ и объектам защиты предназначена для структуризации всех собранных исходных данных и требований по ИБ, сформированных в рамках работы первой функциональной группы. При работе данной функциональной группы происходит формальное распределение собранной исходной информации по составляющим частям СЗИ. В рамках разработанного метода управления ИБ и с целью упрощения понимания принципов систематизации информации данная функциональная группа будет являться собирательным образом элементов каждого из процессов, задействованных в первой функциональной группе с единым полем систематизации. Результатом работы данной функциональной группы будет являться распределение потоков исходных данных и укрупнение их в рамках наиболее простой составляющей в организации – информационной и/или автоматизированной системы.

Группа актуализации информации по СЗИ и объектам защиты предназначена для внесения своевременных изменений, дополнений и расширения общей инфраструктурной информации по объектам и механизмам защиты, а также для поддержания общего уровня

заданных параметров по требованиям нормативно-правовой документации в сочетании с мониторингом протекающих процессов в рамках основных составляющих организации в привязке как к внутреннему, так и внешнему персоналу самой информационной и/или автоматизированной системы, а также представителям третьих сторон.

Группа аналитической обработки, контроля и анализа эффективности реализации механизмов защиты, действующих в рамках СЗИ, предназначена для проведения структурированного анализа собираемых и актуализируемых данных работы первых трех функциональных групп, контроля за соблюдением требований нормативно-правовой документации и комплексного анализа эффективности применяемых средств защиты информации. Данная функциональная группа опирается исключительно на опыт, квалификацию и ответственность экспертной группы, привлекаемой к процессу управления ИБ, и является наиболее важной и ресурсоемкой группой в рамках настоящего метода управления ИБ. С точки зрения теории построения экспертных систем, типовой ее структуры данная функциональная группа будет являться «Решателем» или механизмом вывода данных на основе их анализа для последующего принятия решений.

Группа принятия решений по управлению ИБ и применению корректирующих и предупреждающих воздействий в сочетании с планированием и совершенствованием механизмов защиты, действующих в рамках СЗИ, предназначена для тактического и стратегического управления ИБ на основе получаемых данных от других функциональных групп, формирования своевременного пула действий для принятия корректирующих и предупреждающих воздействий на СЗИ, а также для планирования работ по совершенствованию механизмов защиты информации, реализованных в рамках действующей СЗИ в организации. С точки зрения теории построения экспертных систем данная функциональная группа будет являться «Подсистемой объяснения», а также подсистемой поддержки принятия решений по управлению ИБ в организации.

Общая структура составных процессов управления ИБ с разбиением по функциональным группам и их обобщением с учетом положений теории построения экспертных систем представлена на рис. 1. Для упрощения визуального отображения процессов полные названия процессов заменены более короткими обозначениями.

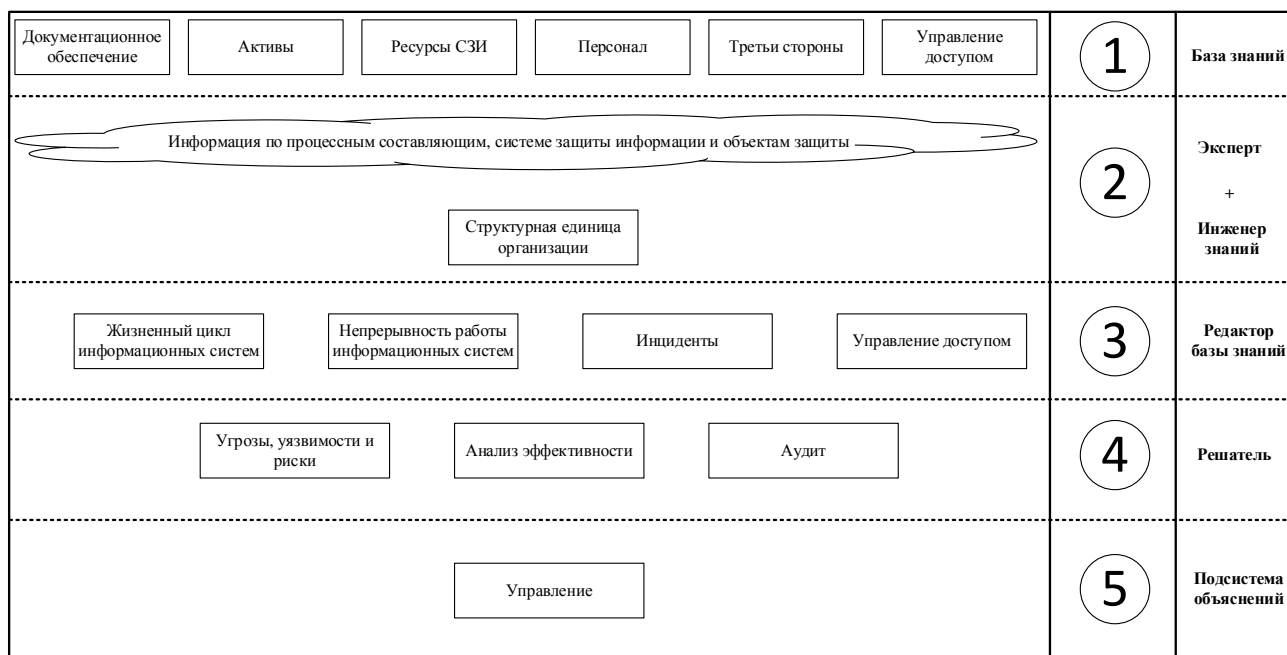


Рис. 1. Структура составных процессов управления ИБ

Таким образом, первым основным действием в рамках разработанного метода управления ИБ на основе теории построения экспертных систем будет являться разделение

процессных составляющих управления и обеспечения ИБ в организации по функциональным группам, реализующим конечное множество действий.

Вторым действием станет формализация общих и частных требований к процессам управления и обеспечения ИБ в организации, исходя из требований внутренних и внешних нормативно-правовых документов по ИБ. В зависимости от типа данных, размера организации и ее основной деятельности формализация частных требований может иметь значительное отличие, однако формализация общих требований будет совпадать.

Третье действие – сбор исходной информации по объектам защиты и СЗИ в целом. В рамках данного действия необходимо определить начальный перечень информации по приоритетным направлениям.

Четвертым действием будет являться систематизация полученных исходных данных по минимально значимым составным частям организации, а также присвоение определяемых классификаторов взаимодействия и/или взаимозависимости данных по их типу. Такими частями могут являться автоматизированные и/или информационные системы, ответственные лица организации, административный персонал и т. д. В зависимости от состава и характера определенных минимально значимых составных частей организации будут зависеть поведенческие правила работы СЗИ. В случае наличия они могут быть описаны в виде политик, регламентов и концепций по ИБ в организации, а в случае отсутствия – должны формироваться по результатам выполнения данного действия в рамках применения метода управления ИБ на основе теории построения экспертных систем.

Пятым действием станет определение состава и степени возможной корректировки классификаторов и моделей взаимодействия, а также состава информации по основным минимально значимым составным частям организации, а также последующая формализация данного действия, закрепленного в руководящих и организационно-распорядительных документах организации по ИБ. В результате данного действия должны появиться формализованные положения и регламенты обеспечения сопровождения, мониторинга и поддержания работоспособности как СЗИ в целом, так и ее составных частей.

Шестым действием будет являться определение, обоснование и применение методик определения актуальности угроз, уязвимостей и рисков ИБ в организации, а также методик оценки эффективности работы СЗИ и ее составных частей, методик проведения аудита и оценки степени соответствия требованиям внешних и внутренних регулирующих органов.

Седьмое действие связано с определением параметров и выработкой основных управленческих концепций и регламентов по реагированию и своевременному применению управляющих, корректирующих и предупреждающих воздействий на события как внутри организации, так и внутри СЗИ.

Восьмым действием будет формирование и обоснование планов дальнейшего развития и совершенствования СЗИ в целом и механизмов защиты в частности, а также пересмотр применимости ранее выбранных методик с целью повышения эффективности действующей СЗИ.

В рамках выполнения четвертой задачи по разработке модели взаимодействия данных при осуществлении управления ИБ были предложены модели как по общему взаимодействию данных между процессными составляющими управления ИБ, так и по частному взаимодействию данных внутри каждого составляющего процесса. Общая модель взаимодействия данных разработанного метода представлена на рис. 2.

После сортировки информации по составляющим частям организации происходит формализация основных процессов обеспечения ИБ в рамках применимости к данным составным частям (угрозы, уязвимости и риски, анализ эффективности, аудит). На основе проводимого анализа формируются три основных выходных сигнала по управлению ИБ в организации (планирование, управляющие воздействия, корректирующие и предупреждающие воздействия). Данные о них возвращаются по каналам обратной связи к СЗИ и нормативно-правовым требованиям, закрепленными во внешней и внутренней документации организации.

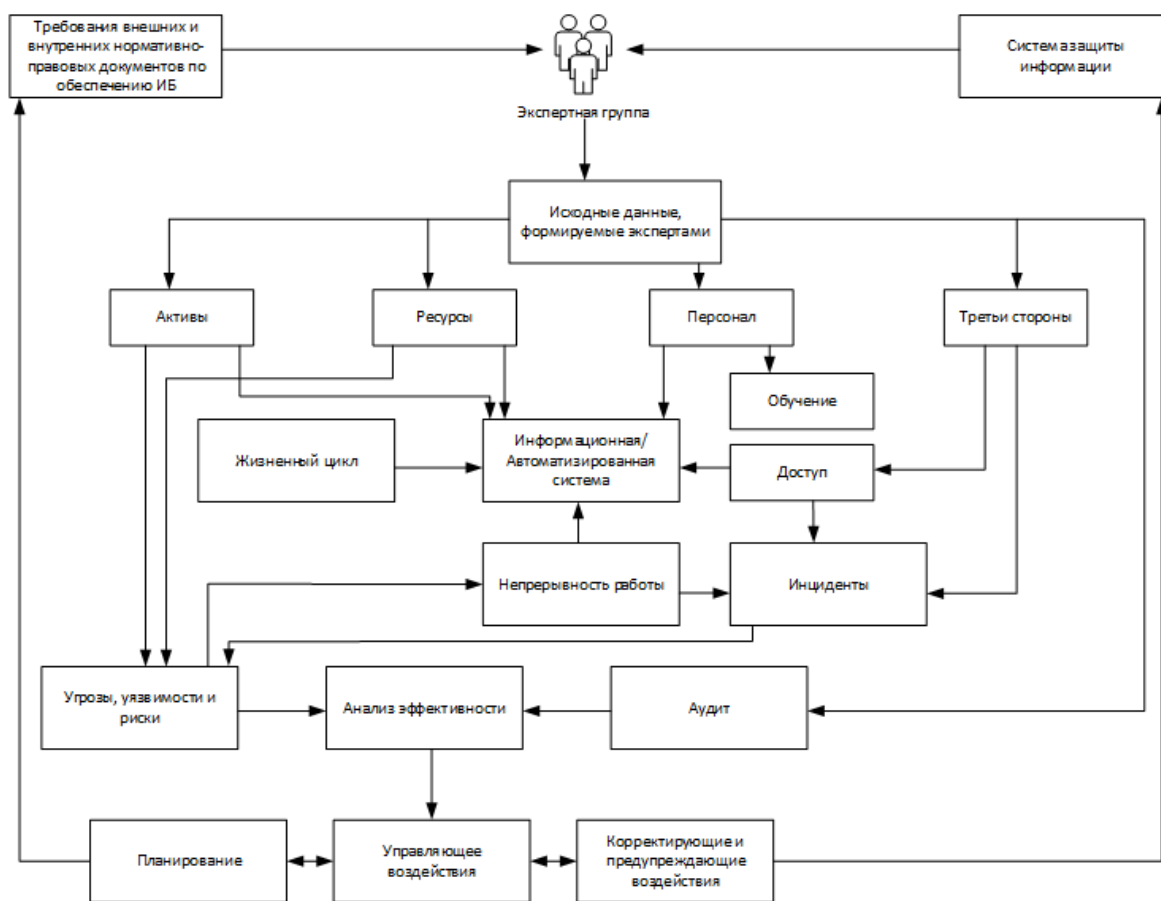


Рис. 2. Общая модель взаимодействия данных метода управления ИБ на основе теории построения экспертных систем

Далее процесс повторяется. Таким образом соблюдается подход к защите информации как к непрерывному процессу направленному на обеспечение ИБ. При этом ряд процессов направлен на обеспечение актуализации и сбор новых данных по составным частям организации (жизненный цикл, непрерывность работы) и обеспечение соответствующего контроля за соблюдением общих требований к обеспечивающим процессам (доступ, обучение, инциденты).

В рамках выполнения пятой задачи по разработке программных модулей реализации метода управления ИБ на основе теории построения экспертных систем были сформированы функциональные требования по реализации данного метода с использованием средств автоматизации. В результате был создан программный продукт, обеспечивающий выполнение положений разработанного метода, и апробирован ряд процессов, сопровождающихся разработкой экспертных систем, а также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616993 от 30 июля 2013 г.

Заключение

В результате проведения исследования по разработке метода и модели управления ИБ на основе теории построения экспертных систем:

- был проведен анализ действующих международных и Российских нормативно-правовых документов;
- выявлены основные процессные составляющие управления ИБ;
- разработан метод управления ИБ на основе теории построения экспертных систем;
- сформирована модель взаимодействия данных для предлагаемого метода;
- предложен метод автоматизированного определения вероятности возникновения угроз ИБ в совокупности с методом оценки степени опасности реализации угроз ИБ.

Совокупность формализованных требований по процессным составляющим управления ИБ, разработанных методов и модели взаимодействия данных была систематизирована и получила конечное выражение в виде программных модулей, реализующих метод управления ИБ на основе теории построения экспертных систем.

Полученные результаты в рамках выполнения исследования дают новый взгляд на проблему управления ИБ, расширяют границы применимости теории построения экспертных систем, а полученные методы и модели вносят существенный вклад в теорию ИБ и увеличивают возможность автоматизации основных процессов обеспечения ИБ, значительно повышая показатели эффективности СЗИ.

Публикации

1. *Исаев А.С.* Автоматизация процесса формирования модели угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных на основе теории построения экспертных систем // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 2. С.133–135.
2. *Исаев А.С., Чичев М.С.* Разработка системы авторизации и аутентификации согласно пермиссионной модели управления правами доступа на основе фреймворка Spring Security // Проблема комплексного обеспечения информационной безопасности и совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов силовых структур: Межвузовский сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции ИКВО НИУ ИТМО. СПб., 2014. С. 111–117.
3. *Исаев А.С., Жигулин Г.П.* Автоматизация процессов управления информационной безопасностью // Там же. С. 80–83.

Литература

1. ISO/IEC 27001:2005. Information technology. Security techniques. Information security management systems. Requirements.
2. ISO/IEC 17021:2006. Conformity assessment. Requirements for bodies providing audit and certification of management systems.
3. ISO 9000:2005. Quality management systems. Fundamentals and vocabulary.



Казаков Сергей Владимирович
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: svkazakov@rain.ifmo.ru

СБОРКА КОНТИГОВ ГЕНОМНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ

С.В. Казаков

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

Многие современные задачи биологии и медицины требуют знания генома живых организмов, который состоит из нескольких нуклеотидных последовательностей ДНК.

Изучение генома человека и других живых существ имеет важное прикладное значение. На основании результатов сборки генома конкретного человека возможна

реализация персонифицированной медицины [1] – определения предрасположенности человека к различным болезням, создание индивидуальных лекарств и т. д. Кроме этого, на основе результатов исследования геномов растений и животных с использованием методов биоинженерии могут быть выведены новые их виды, обладающие определенными свойствами.

При изучении генома живого существа обычно выделяют три основных этапа:

- секвенирование молекул ДНК, содержащих информацию о геноме (выполняется с использованием специальных устройств-секвенаторов);
- сборка геномной последовательности (или коротко – сборка генома, выполняется с использованием компьютеров);
- анализ и сравнение геномов (выполняется с использованием компьютеров).

Задача разработки методов сборки геномных последовательностей является, в определенном смысле, центральной среди всех задач биоинформатики. Это объясняется тем, что без ее решения нельзя приступить к детальному изучению генома живого существа и его анализу с применением других алгоритмов биоинформатики.

При решении этой задачи возникает большое число трудностей: ошибки в исходных чтениях, плохое покрытие генома, сложная его структура и др. Все это существенно ухудшает качество работы современных сборщиков генома, и, как следствие, падает достоверность результатов анализа собранного генома.

Цель работы – разработка и применение нового подхода для улучшения основного этапа сборки генома – сборки контигов, проведение экспериментальных исследований.

Обычно решением задачи сборки геномных данных является набор контигов, которыми называется непрерывная последовательность нуклеотидов. При этом предполагается, что такие (или близкие к ним) контиги действительно присутствуют в геноме.

Для решения указанных проблем сборку геномной последовательности обычно разбивают на следующие этапы:

- исправление ошибок в исходных данных;
- восстановление фрагментов генома по парным чтениям, такие фрагменты называются квазиконтигами;
- сборка контигов (расширенных фрагментов) из квазиконтигов;
- построение скэффолдов – упорядоченных контигов с оценкой на расстояния между ними.

В работе рассматривается сборщик генома *ITMO Genome Assembler* [2–4], который разрабатывается в Университете ИТМО. Данный сборщик хорошо зарекомендовал себя в рамках проектов *de novo Genome Assembly Project* [5] и *Assemblathon 2* [6]. На основе этого сборщика будут тестироваться предлагаемые алгоритмы.

Архитектура сборщика *ITMO Genome Assembler* показана на рис. 1.

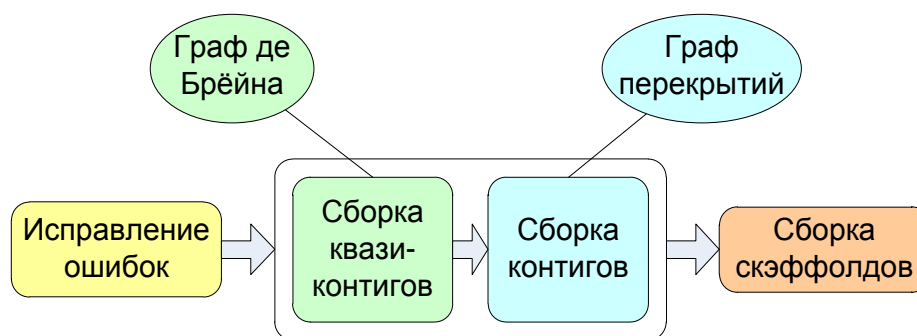


Рис. 1. Архитектура сборщика

Сборка контигов из квазиконтигов в *ITMO Genome Assembler* основана на распространенном подходе *overlap-layout-consensus* и состоит из нескольких этапов:

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

- поиск перекрытий (*overlap*);
- удаление транзитивных перекрытий;
- построение графа перекрытий и его упрощение;
- вывод первого приближения контигов (*layout-consensus*).

Одним из этапов сборки контигов из квазиконтигов является этап построения графа перекрытий и его упрощение. Графом перекрытий [7] называется граф, вершины которого – квазиконтиги, а ребра между ними проводятся, если соответствующие квазиконтиги перекрываются. При этом на ребре пишется длина соответствующего перекрытия. Пример графа перекрытий изображен на рис. 2.

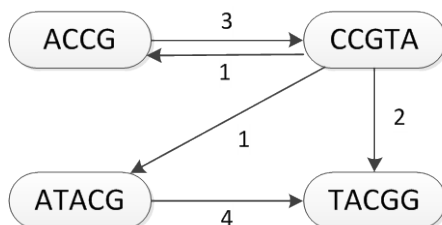


Рис. 2. Граф перекрытий

Граф перекрытий довольно легко построить, зная все перекрытия между квазиконтигами. Он очень удобен для последующей работы над перекрытиями и квазиконтигами благодаря наглядному отображению ситуации. При построении графа перекрытий обычно выясняется, что он очень запутан. Одна из маленьких частей реального графа перекрытий изображена на рис. 3.

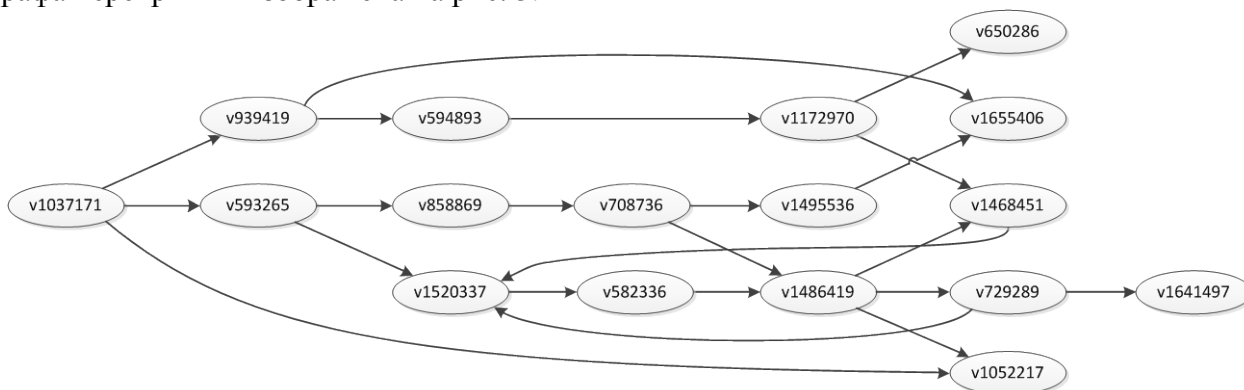


Рис. 3. Часть графа перекрытий

Уже на следующем этапе – стадии *Layout* (вывод первого приближения контигов) – происходит определение и вывод контигов. Один контиг получается из одного простого пути в графе перекрытий. Поэтому встает задача определения простых путей в графе перекрытий – тех путей, которые соответствуют реальным контигам.

Таким образом, наиболее интересная и трудная задача в процессе сборки контигов из квазиконтигов – не просто расширить квазиконтиги настолько, насколько это возможно, а распутать граф перекрытий, то есть выделить в нем простые пути.

Простым путем в графе перекрытий называется путь, все вершины которого (кроме начальной и конечной) имеют ровно одно входящее и одно исходящее ребро, а начальная и конечная вершины имеют одно исходящее и одно входящее ребро соответственно.

Для части графа, изображенного на рис. 3, часть графа, которая должна получиться после упрощения, изображена на рис. 4.

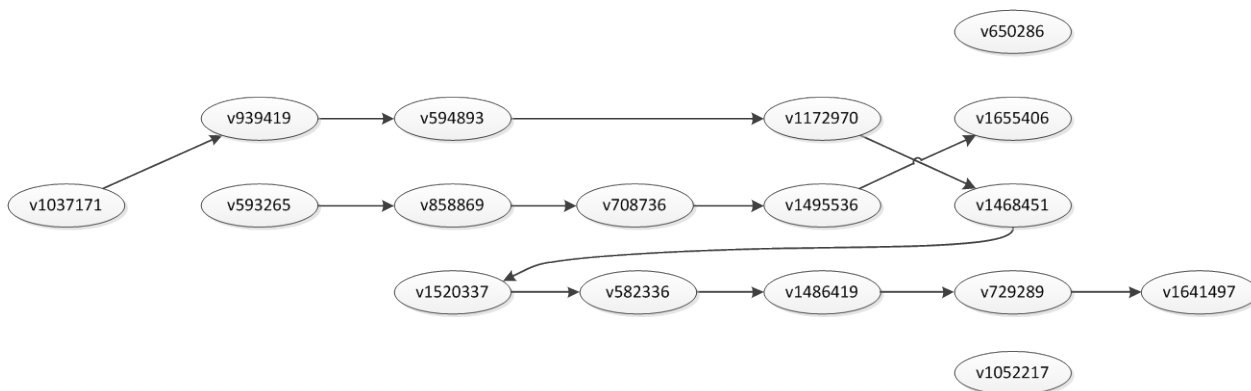


Рис. 4. Распутанный граф перекрытий

Традиционно при сборке контигов выделяют приоритеты:

- уменьшить число ошибочных контигов, то есть таких, которые не встречаются в реальном геноме;
- увеличить среднюю длину собранных контигов (при неизменной суммарной длине всех собранных контигов).

Существует много решений проблемы запутанности графа перекрытий. Можно выделить несколько типов решений описанной проблемы:

1. Упрощение на основе анализа каждого ребра и выявления маловероятных ребер [8].

2. Объединение схожих путей.

3. Удаление отростков.

4. Анализ развилок и их упрощение.

5. Анализ путей и выявление наиболее достоверных.

Существуют и другие решения, которые не относятся ни к одному из этих классов [9].

Тем не менее распутать граф перекрытий до однозначно выделяемых простых путей не всегда удастся. Связано это с тем, что достоверно определить и исключить все ошибочные ребра, а также все ошибочные пути практически невозможно.

В рамках научного исследования автором предлагается применить новый высокоуровневый подход для распутывания графа: анализ довольно больших путей и оценивание каждого из них с использованием статистических гипотез. Предлагается выполнять такой анализ после предварительного упрощения графа перекрытий (чтобы путей для анализа оставалось не слишком много), а именно после выполнения этапов 2 и 3, описанных выше.

В работе предлагается использовать следующие статистические тесты как меру надежности и достоверности больших путей в графе перекрытий:

- тест на среднее покрытие пути k -мер'ами (строками длины k);
- тест на минимальное покрытие пути k -мер'ами;
- тест на согласованность длин фрагментов закартировавшихся парных чтений с нормальным распределением;
- тест на минимальную длину закартировавшегося парного чтения;
- тест на покрытие повтора закартировавшимися чтениями.

Предлагаемый подход тестировался на базе сборщика *ITMO Genome Assembler*. Для картирования чтений использовалась сторонняя программа *bowtie* [10].

Экспериментальная проверка состояла из двух проверок:

- генерации модельных исходных данных из собранного генома, внесения ошибок разного типа в них, запуска предложенного алгоритма и анализа результатов для каждого из типов ошибок;

• использования реальных квазиконтигов и сравнения получаемых контигов с контигами, получаемыми другими методами.

Первая проверка проходила с использованием собранного генома кишечной палочки *Escherichia coli* (*E. coli*), длина генома 4 639 675 нуклеотидов. Из собранного генома было сгенерировано 1 тыс. путей со средней длиной 5 тыс. нуклеотидов, в которые поочередно вносились ошибки разного рода:

• обычные ошибки (моделирование ситуации ошибок в исходных квазиконтигах): замена некоторого нуклеотида другим, добавление indel-ошибки (вставки и удаления, небольшой длины: 1–5 нуклеотидов). Число измененных нуклеотидов не превышало 50 (не более 1 % от общей длины пути);

• ошибки из-за повторов малой длины: в исходные пути вносились ошибки таким образом, как будто при построении пути использовалось ошибочное ребро – одна часть пути из одной части генома, другая – из другой;

• ошибки из-за повторов большой длины: моделировалась ситуация существования большого повтора и выбирался неправильный путь в такой ситуации (путь обязательно полностью пересекал повтор, иначе эта ошибка предыдущего типа).

Результаты тестирования предложенного метода приведены в Табл. 1.

Таблица 1

Результаты статистических тестов на путях с разными ошибками

Исходные данные	Принята нулевая гипотеза	Принята альтернативная гипотеза
Безошибочные пути	96 %	4 %
Обычные ошибки	90 %	10 %
Ошибки из-за повторов малой длины	1,5 %	98,5 %
Ошибки из-за повторов большой длины	93 %	7 %

Из таблицы видно, что лучше всего предложенный метод работает на ошибках, возникающих из-за повторов малой длины, а при безошибочных путях удаляются 4 % правильных путей.

Вторая экспериментальная проверка проходила на трех наборах квазиконтигов: два из них были собраны из реальных парных чтений бактерии кишечной палочки *Escherichia coli* (*E. coli*) с длиной генома 4 639 675 нуклеотидов; один был сгенерирован из собранного генома *E. coli* для проверки эффективности предложенного метода при условии отсутствия ошибок в квазиконтигах. Проводилось сравнение предложенного метода со стандартным методом распутывания графа перекрытия, реализованным в *ITMO Genome Assembler*, а также с методом, основанным на поиске и удалении ошибочных ребер, предложенным в работе [8]. Результаты оценивались по главным показателям качества сборки – числу ошибочных контигов и средней длине собранных контигов (а также с использованием других второстепенных показателей качества).

Для первого набора, состоящего из 500 тыс. квазиконтигов, полученные результаты представлены в Табл. 2 (жирным шрифтом выделен наилучший результат по одной из характеристик). Для второго набора, состоящего из 1 млн 500 тыс. квазиконтигов, полученные результаты представлены в Табл. 3.

Как видно из таблицы, предложенный подход заметно улучшает качество сборки на всех тестируемых наборах по обоим главным показателям по сравнению со стандартным методом, реализованным в *ITMO Genome Assembler*. Предложенный метод по числу ошибочных контигов также ничем не уступает методу с поиском и удалением ошибочных ребер, не используя ключевую идею метода. А по средней длине контига (и N50) заметно опережает последний, улучшая тем самым качество итоговой сборки.

Таблица 2

Результаты сравнения собранных контигов разными методами на исходных данных в 500 тыс. квазиконтигов

Метод / Характеристика	<i>ITMO Genome Assembler</i>	<i>ITMO Genome Assembler</i> с удалением ошибочных ребер	Предложенный метод
Число контигов	572	579	561
Средняя длина контига	7 921	7 872	8 125
Суммарная длина контигов	4 530 812	4 557 888	4 558 125
N50	13 534	13 614	15 592
Число ошибочных контигов	9	4	4

Таблица 3

Результаты сравнения собранных контигов разными методами на исходных данных в 1 млн 500 тыс. квазиконтигов

Метод / Характеристика	<i>ITMO Genome Assembler</i>	<i>ITMO Genome Assembler</i> с удалением ошибочных ребер	Предложенный метод
Число контигов	419	425	402
Средняя длина контига	10 850	10 710	11 327
Суммарная длина контигов	4 545 970	4 551 647	4 553 256
N50	17 139	18 023	19 546
Число ошибочных контигов	7	4	4

Заключение

В работе предложен метод упрощения графа перекрытий, основанный на тестировании возможных путей с помощью нескольких статистических тестов и выборе наиболее оптимального пути. Метод был протестирован на нескольких наборах исходных данных бактерии *E. coli*. Результаты экспериментов показали его применимость и эффективность.

Таким образом, цели работы достигнуты – существующие решения проблемы запутанности графа перекрытий улучшены, проведены экспериментальные исследования предложенного подхода и выявлены его сильные и слабые стороны. Данный подход можно применять для улучшения качества сборки генома. Автор работы рекомендует внедрять предложенный алгоритм в другие сборщики геномных последовательностей и настраивать его для получения более качественных результатов сборки.

Результаты представленной работы еще не опубликованы в научных журналах ввиду небольшого промежутка времени, прошедшего с момента их получения.

Публикации

1. Царев Ф.Н., Александров А.В., Казаков С.В., Мельников С.В., Сергушичев А.А., Шалыто А.А. Метод исправления ошибок в наборе чтений нуклеотидной последовательности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 5 (75). С. 81–84.
2. Александров А.В., Исенбаев В.В., Казаков С.В., Сергушичев А.А., Мельников С.В., Царев Ф.Н. Метод сборки генома с помощью восстановления его фрагментов по парным чтениям // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2011. С. 220–221.

3. Александров А.В., Казаков С.В., Мельников С.В., Сергушичев А.А., Царев Ф.Н. Метод сборки контигов геномных последовательностей на основе совместного применения графов де Брюина и графов перекрытий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 93–98.
4. Kazakov S., Shalyto A. Overlap graph simplification using edge reliability calculation // Proceedings of the 8th International Conference Intelligent Systems and Agents 2014. Lisbon, 2014. P. 222–226.

Литература

1. Soh D. et al. Enabling more sophisticated gene expression analysis for understanding diseases and optimizing treatments // ACM SIGKDD Explorations Newsletter. 2007. Vol. 9. No 1. P. 3–13.
2. Царев Ф.Н., Александров А.В., Казаков С.В., Мельников С.В., Сергушичев А.А., Шалыто А.А. Метод исправления ошибок в наборе чтений нуклеотидной последовательности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 5 (75). С. 81–84.
3. Александров А.В., Исенбаев В.В., Казаков С.В., Сергушичев А.А., Мельников С.В., Царев Ф.Н. Метод сборки генома с помощью восстановления его фрагментов по парным чтениям // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2011. С. 220–221.
4. Александров А.В., Казаков С.В., Мельников С.В., Сергушичев А.А., Царев Ф.Н. Метод сборки контигов геномных последовательностей на основе совместного применения графов де Брюина и графов перекрытий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 93–98.
5. De novo Genome Assembly Assessment Project [Official website]. URL: <http://cnag.bsc.es> (accessed: 28.01.2015).
6. Assemblathon 2 [Official website]. URL: <http://assemblathon.org> (accessed: 28.01.2015).
7. Simpson J.T., Durbin R. Efficient de novo assembly of large genomes using compressed data structures // Genome Research. 2012. Vol. 22. No 3. P. 549–556.
8. Kazakov S., Shalyto A. Overlap graph simplification using edge reliability calculation // Proceedings of the 8th International Conference Intelligent Systems and Agents 2014. Lisbon, 2014. P. 222–226.
9. Lai B. et al. A de novo metagenomic assembly program for shotgun DNA reads // Bioinformatics. 2012. Vol. 28. No 11. P. 1455–1462.
10. Bowtie: An ultrafast memory-efficient short read aligner [Official website]. URL: <http://bowtie-bio.sourceforge.net/index.shtml> (accessed: 28.01.2015).



Касаткина (Фомина) Наталия Александровна
Институт международного бизнеса и права
Кафедра правовых дисциплин
E-mail: Lawmail@bk.ru

СРАВНИТЕЛЬНО-ПРАВОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ ГОСУДАРСТВЕННОГО УСТРОЙСТВА СОВРЕМЕННОСТИ

Н.А. Касаткина

Научный руководитель – профессор М.Х. Гельдибаев

Впервые вводится в оборот определение формы государственного устройства, отражающее все признаки данного явления, под которым понимается внутренняя

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

(территориальная) организация государственной власти, детерминирующая порядок его образования, правовое положение и характер взаимоотношений государства в целом и его составных частей, выраженные в степени централизации власти и порядке разграничения компетенции. На основании этого сделан вывод о существовании таких самостоятельных видов формы государственного устройства, как союзы, империи, унитарные и федеративные государства.

Произведена классификация всех форм государственного устройства по критерию времени их действия, на основании чего было выявлено, что к формам государственного устройства современности относятся только унитарные и федеративные государства. Определены перспективы замены федеративной формы государственного устройства союзной, представляющей идеальную модель для государственного строительства.

Обоснована специфика регионального государства как разновидности унитарного, в связи с тем, что включаемые автономии не обладают статусом государственных образований. При этом отмечается близость регионального государства к федеративному и его переходный характер. Выявлена специфика такой формы государственного устройства, как союз, которая в будущем заменит федерацию и будет существовать наравне с унитарными государствами.

В ходе анализа форм государственного устройства был сделан вывод об интеграции федеративных и унитарных его форм и аргументирована тенденция их сближения. Она объясняется недостаточностью каждой из этих моделей, взятых по отдельности, так как они не могут полностью отвечать общественным отношениям, существующим в разных странах.

Целью исследования выступает выявление сущностных характеристик и определение основных понятий форм государственного устройства современности, обозначение основных тенденций и возможных перспектив их развития.

В связи с поставленной целью главными задачами являются:

- исследование терминологической специфики форм государственного устройства, рассмотрение подходов к определению сущности его форм и формулирование самого понятия «форма государственного устройства»;
- классификация форм государственного устройства, выявление соотношения форм государственного и межгосударственного устройства;
- формулирование понятия и проведение анализа видов унитарного и федеративного государств;
- формулирование наиболее адекватного определения такого явления как федерализм, рассмотрение и раскрытие основных его принципов;
- обозначение тенденции развития формы государственного устройства.

Методологическую основу при проведении исследования составили общеполитологический диалектический метод, позволивший рассматривать формы государственного устройства в их развитии и взаимодействии, синергетический и общенаучные методы познания, такие как формально-логический, синтез, анализ, сравнение, абстрагирование, аналогия, индукция, дедукция, метод соответствия логического и исторического, восхождение от абстрактного к конкретному и структурно-функциональный.

Особое внимание уделялось методам обобщения и идеального моделирования. Последний применялся в целях построения моделей унитарных и федеративных отношений, максимально приближенных к идеальным. Для подтверждения сути исследуемого явления активно использовались частнонаучные методы, такие как сравнительно-правовой и технико-юридический анализ.

Нормативную базу исследования составили конституции, иные нормативные правовые акты, нормативные договоры и другие официальные документы государств. Для выявления особенностей современного российского федерализма использовались Постановления Конституционного Суда Российской Федерации. Теоретическую основу исследования составляют выводы ученых – теоретиков государства и права по вопросам государственного

устройства, содержащиеся в авторефератах на соискание степеней кандидатов и докторов наук, монографиях, научных статьях и теоретических материалах.

Области возможного использования результатов проекта

Теоретическая значимость проекта характеризуется возможностью использования данного исследования в целях развития идей государственного устройства как в Российской Федерации, так и в зарубежных странах.

Материалы проекта могут служить методологической и теоретической основой для дальнейшего исследования вопросов государственного устройства, а также применяться в качестве отдельной темы в рамках раздела «Форма государства» в курсах теории государства и права и политологии и выступать специальным курсом по государственному праву.

Практическая значимость определяется возможностью использования данного исследования в качестве источника для совершенствования существующей формы государственного устройства страны посредством изменения действующего законодательства, что особенно актуально в связи с включением в состав Российской Федерации новых субъектов.

Материалы проекта использованы при подготовке и проведении лекций и семинарских занятий по курсам правоведение и основы права в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики.

Основные выводы

При характеристике территориальной организации государства, организации государственной власти между центром и составляющими его частями, в юридической литературе следует использовать термин «форма государственного устройства», который должен отражать сущность исследуемого явления.

Давая определение формы государственного устройства, необходимо учитывать следующие важные признаки данного понятия:

- форма государственного устройства отражает только внутреннюю (территориальную) организацию власти в стране;
- она охватывает только государственную власть и не имеет отношения к местному самоуправлению;
- определяет правовое положение составных частей государства;
- характеризует взаимоотношения государства и его составных частей, выраженные в степени централизации власти и порядке разграничения компетенции;
- определяет порядок образования государства, что выражается в указании на добровольность или насильственность его создания, а также на территориальный, национальный или территориально-национальный принципы, положенные в основу его образования.

В результате исследования была проведена классификация форм государственного устройства. Впервые был применен критерий времени действия для определения перспектив развития существующих форм государственного устройства. Так, в соответствии с данным критерием, они были подразделены на такие, которые в наше время не встречаются – империи и союзы, а также формы государственного устройства современности – унитарные и федеративные государства.

Империи и союзы как формы государственного устройства не характерны для настоящего времени в силу присущих им особенностей. В частности, такой признак как насильственность создания империи не отвечает условиям демократического, либерального общества и порицается в наше время, а стремление к расширению территориальных границ означает захват территории другого государства, что недопустимо с точки зрения мирового порядка.

Союз же в отличие от империи вполне возможен в настоящее время, так как характеризуется договорной природой создания, и кроме того, данная форма государственного устройства является более приемлемой, чем федеративная, так как наилучшим образом обеспечивает государственное единство проводимой политикой не сверху, а снизу, то есть не властью государства, а интересами территорий.

Сделан обобщающий вывод, имеющий прикладное значение с точки зрения описания юридической природы форм государственного устройства, о существовании таких самостоятельных форм государственного устройства, как союзы, империи, унитарные и федеративные государства.

В результате анализа существующих в современности форм государственного устройства был получен вывод о принадлежности региональных государств к разновидности унитарной формы государственного устройства. При этом региональное государство является близким по своей юридической природе к федеративному, и часто между ними сложно провести различие в силу переходного характера регионального государства, что является следствием интеграции унитарной и федеративной форм государственного устройства.

Выявлена специфика такой самостоятельной формы государственного устройства, как союз, которая характеризуется договорной формой создания государства, паритетным правовым положением составных частей, их возможностью реализовывать свою исторически сложившуюся самобытность посредством национального суверенитета и предоставлением права сепарации.

Хочется особенно отметить перспективность данной формы государственного устройства, так как она строится на идее сплоченности государства, осуществляемой не сверху, а снизу, то есть не властью центра, а общими, унифицированными интересами частей. Если составным частям удастся договориться и образовать союз на выгодных для них условиях, то, даже несмотря на возможность выхода из состава подобного государства, они сами будут обеспечивать его целостность, не используя принадлежащее им право сепарации.

Для союза как формы государственного устройства необходимо создание такого экономического уровня, гражданско-правового, культурного и религиозного состояния, которые обеспечат паритетный статус составных частей. Это позволит им реализовывать свои права и не использовать право выхода из состава союза, отдав приоритет его целостности и тем самым обеспечив принцип целостности государства. Однако в настоящее время достижение подобных условий весьма проблематично, поэтому данная форма государственного устройства не характерна для современной эпохи, хотя была бы идеальной и предпочтительной для государственного строительства и заменила бы федеративную форму.

Перспективы развития форм государственного устройства, в целом, заключаются в том, что наибольшее распространение в дальнейшем получают унитарная форма государственного устройства и союз.

При анализе существующих в современном мире форм государственного устройства был сделан вывод о том, что унитарные и федеративные формы не могут полностью отвечать общественным отношениям, существующим в разных странах. Например, в Италии, Испании и Португалии унитарные государства полностью состоят из автономий, которые стремятся к получению статуса субъекта, характерного для федеративных государств. В связи с этим была отмечена тенденция интеграции существующих форм государственного устройства, которая объясняется недостаточностью каждой из этих моделей, взятых по отдельности. Наличие форм государственного устройства предполагает все более активное их воздействие на характер и формы общественных отношений.

Публикации

1. *Фомина Н.А.* Разновидности форм государственного устройства современности // Мир юридической науки. 2010. № 3. С. 6–11.
2. *Фомина Н.А.* К вопросу об определении принципов построения и функционирования федеративного государственного устройства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки. 2010. Вып. 1 (105). С. 106–111.
3. *Снетков В.Н., Фомина Н.А.* Классификация современных моделей федераций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки. 2010. Вып. 2 (111). С. 44–51.
4. *Снетков В.Н., Фомина Н.А.* Критерии классификации унитарных государств // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки. 2011. Вып. 1 (118). С. 36–42.
5. *Снетков В.Н., Фомина Н.А.* Факторы, влияющие на становление форм государственного устройства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки. 2011. Вып. 4 (136). С. 61–65.
6. *Касаткина Н.А.* Проблема неопределенности терминологии понятия «форма государственного устройства» // VII весенние юридические чтения: международная научно-практическая конференция. М., 2014. С. 8–11.
7. *Фомина Н.А.* Формы государственного устройства современности: теоретико-правовые аспекты. СПб., 2011. – 214 с.



Киреевков Валерий Евгеньевич
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики
E-mail: vekireenkov@gmail.com

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХВОЛНОВОГО ДИФРАКЦИОННОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА

В.Е. Киреевков

Научный руководитель – доцент А.Н. Иванов

Цели работы – исследование возможности применения двухволнового дифракционного способа измерения для оценки пространственного положения объекта с высокой точностью.

В ходе работы были решены следующие задачи:

- исследованы возможности получения нониусных полос при некогерентном сложении двух дифракционных картин, созданных источниками с разными длинами волн, их математическое моделирование и анализ;
- разработан алгоритм предварительной обработки дифракционных картин с целью увеличения контраста нониусных полос;
- выполнена оценка точностных и метрологических характеристик схемы;
- создан макет измерительной установки для проверки математической модели.

Анализ оптических способов контроля показал, что для указанных задач можно использовать дифракционные способы контроля, которые основаны на освещении объекта (марки) лазерным излучением и последующей регистрации дифракционной картины (рис. 1). Расстояние между характерными точками дифракционной картины прямо пропорционально расстоянию между дифракционной картиной и маркой.

Поэтому дифракционный способ контроля может быть использован для измерения расстояния до объекта при условии, что на нем размещается ретрорефлектор или сама марка. Диапазон измерения определяется мощностью лазера и может достигать 10 м.

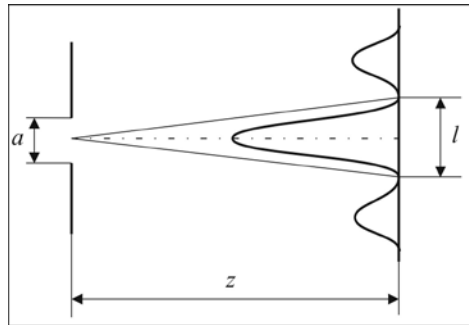


Рис. 1. Схема измерения дистанции дифракционным методом

Точностной анализ дифракционного способа контроля показал, что на его точность наиболее сильно влияют погрешности ширины марки и определения координат характерных точек. Для решения первой проблемы предлагается использовать способ измерения расстояния с подвижной маркой. Для снижения влияния второй ошибки был разработан метод получения нониусных полос.

Данный метод основан на явлении муарового эффекта, при котором при наложении друг на друга сеток (систем параллельных линий), имеющих небольшую разность в шаге, возникает результирующая картина, шаг которой велик по сравнению с шагом сеток. При использовании в качестве сеток мер с шагом, сравнимым с длиной волны света, также возникают муаровые (муар-интерференционные) полосы [3, 4]. В данном исследовании в качестве сеток использовались дифракционные картины, полученные от источников с разными длинами волн.

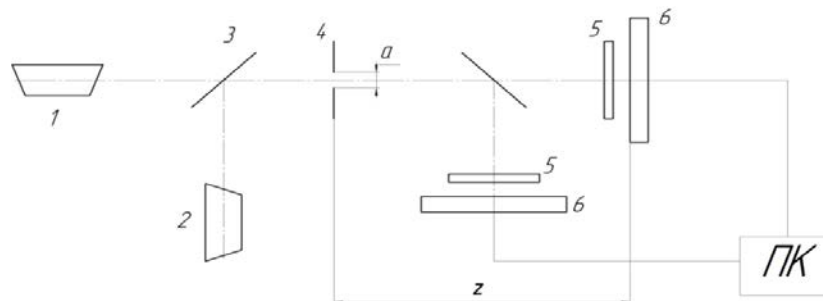


Рис. 2. Схема дифракционного измерителя с двумя лазерными источниками излучения: 1 и 2 – лазер; 3 – светоделитель; 4 – подвижная щель; 5 – светофильтр; 6 – фотоприемник

Схема дифракционного измерителя с двумя лазерными источниками представлена на рис. 2. На фотоприемниках 6 независимо регистрируются дифракционные картины от лазерных источников 1 и 2. Далее картины, полученные численными методами, обрабатываются по разработанному алгоритму, включающему устранение фоновой засветки и выравнивание контраста в дифракционных картинах, а также выделение самих нониусных полос.

Излучение на разных длинах волн не когерентно, следовательно, итоговая интенсивность будет определяться не как сумма амплитуд дифракционных картин, а как сумма или разность их интенсивностей.

Численное моделирование показало, что дифракционная картина содержит низкочастотную составляющую (биения), по которой можно определить расстояние z . (рис. 3)

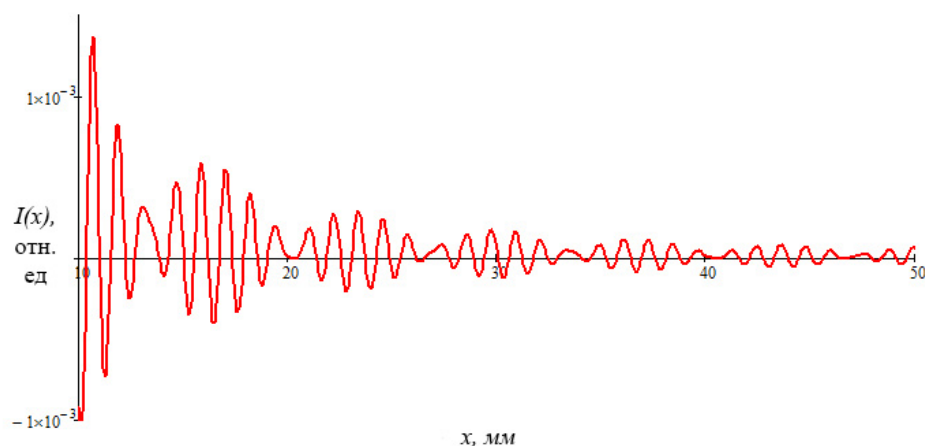


Рис. 3. Разностная дифракционная картина

Для построения огибающей кривой из суммарной картины, приведенной на рис. 3 было использовано преобразование Гилберта [5], которое представляет собой применение к сигналу (изображению) сначала прямого преобразования Фурье, затем умножения получившейся функции на мнимую единицу i и функцию Хэвисайда и ее обратного преобразования Фурье.

Функция огибающей получается путем складывания под квадратным корнем квадратов распределения интенсивности и функции, полученной при преобразовании Гилберта.

Применение преобразования Гилберта к разностной картине дает большую погрешность, из-за не симметричного распределения интенсивности относительно горизонтальной оси координат x . Для устранения ошибки асимметрии реализуется следующий алгоритм [6]:

- вычисляются координаты минимумов и максимумов в разностной картине;
- вычисляются значения сигнала в этих минимумах и максимумах;
- по полученным значениям строятся огибающие функции второго порядка (рис. 4);

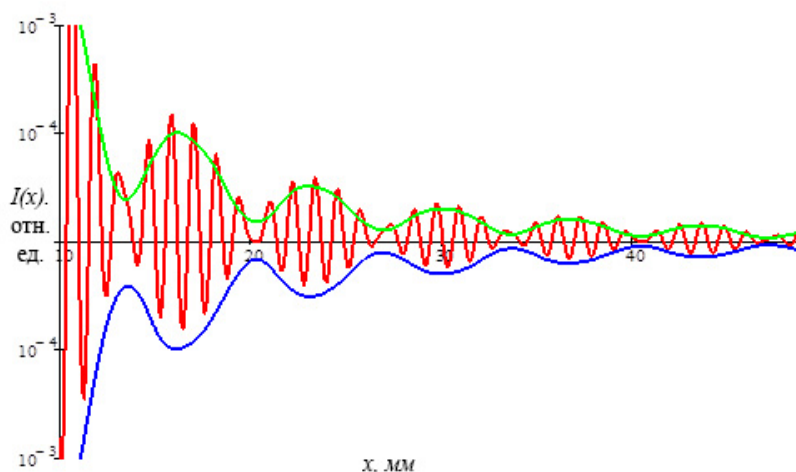


Рис. 4. Огибающая функция второго порядка для максимумов и минимумов

- строится функция средних значений максимумов и минимумов огибающих;
- из распределения интенсивности $I(x)$ вычитается функция средних значений.

Для увеличения точности рекомендуется использовать подобный алгоритм 3-4 раза.

Таким итерационным методом полностью устранить асимметрию невозможно, поэтому остаточные отклонения формы огибающей корректируют с помощью фильтра Гаусса.

– на последнем этапе из огибающей кривой вычитается фоновая составляющая. Итоговый результат приведен на рис. 5.

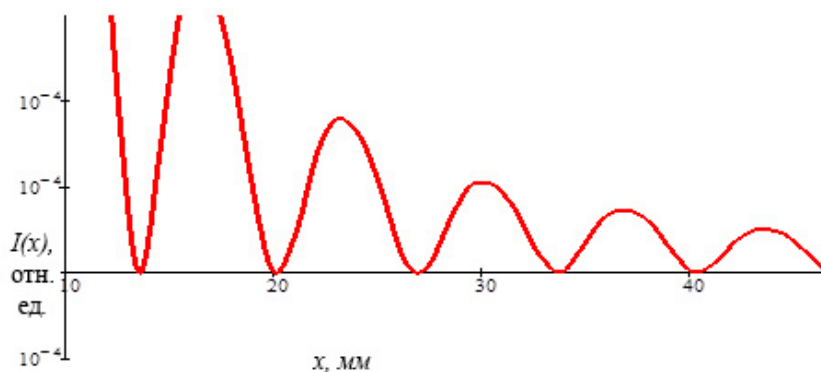


Рис. 5. Итоговый результат обработки

Моделирование показало, что погрешность определения точек огибающей кривой, не превышает 10 мкм. Тогда предельная погрешность измерения дистанции в 1000 мм при ширине щели $a = 0,5$ мм будет равна 2,5 мм, что достаточно много. Для ее устранения требуется разработка более совершенного алгоритма построения огибающей.

Тем не менее, применение двух длин волн позволяет увеличить чувствительность измерений в $\Gamma = \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)$ раз.

Для построения огибающей использовался макет, представленный на схеме рис. 2. Щель была жестко зафиксирована, а ее ширина раскрытия составляла 0,4 мм. Расстояние от щели до плоскости приемника было задано равным 270 мм. Первая дифракционная картина регистрировалась при освещении щели лазером ГН-1,5Б, вторая – при освещении лазером КЛМ-532 с длиной волны 0,532 мкм. Зарегистрированные сечения полос после предварительной обработки приведены на рис. 6.

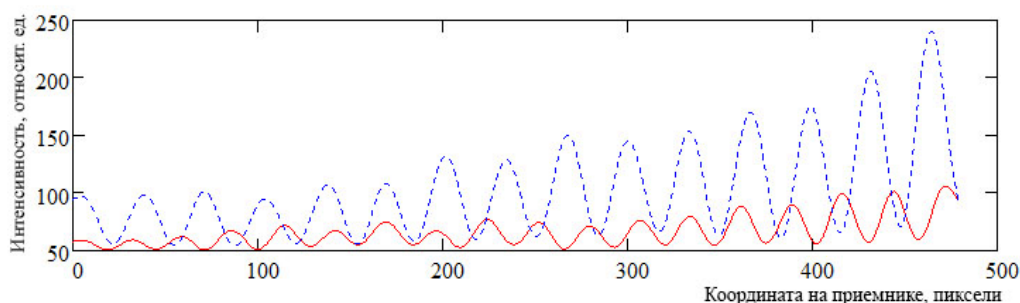


Рис. 6. Сечения полос после предварительной обработки

Перед их вычитанием друг из друга из каждой системы полос был устранен фон [7]. Так как лазеры имеют разную мощность излучения, полученные системы полос были нормированы, что позволило выровнять их амплитуды (рис. 7).

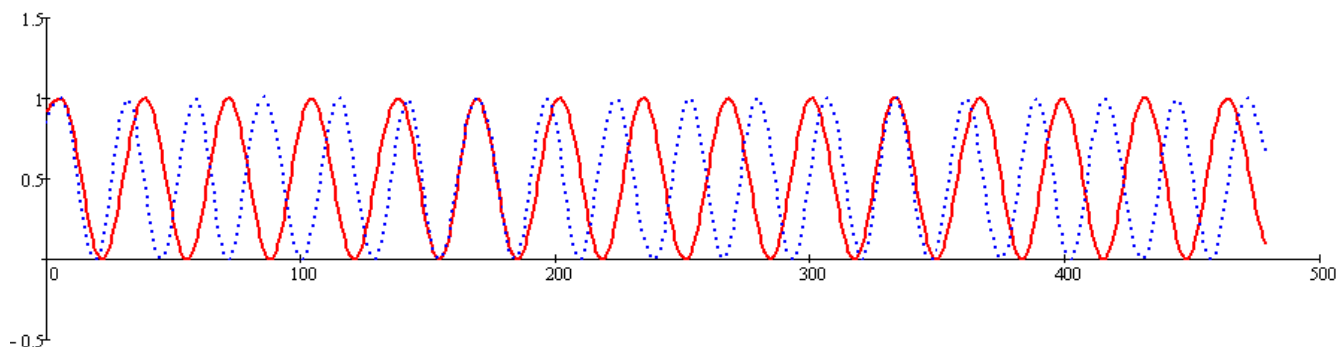


Рис. 7. Результат выравнивания амплитуды сигналов

Вычитание полос позволило получить картину биений и подвергнуть ее обработке по алгоритму, приведенному выше. Огибающая представлена на рис. 8.

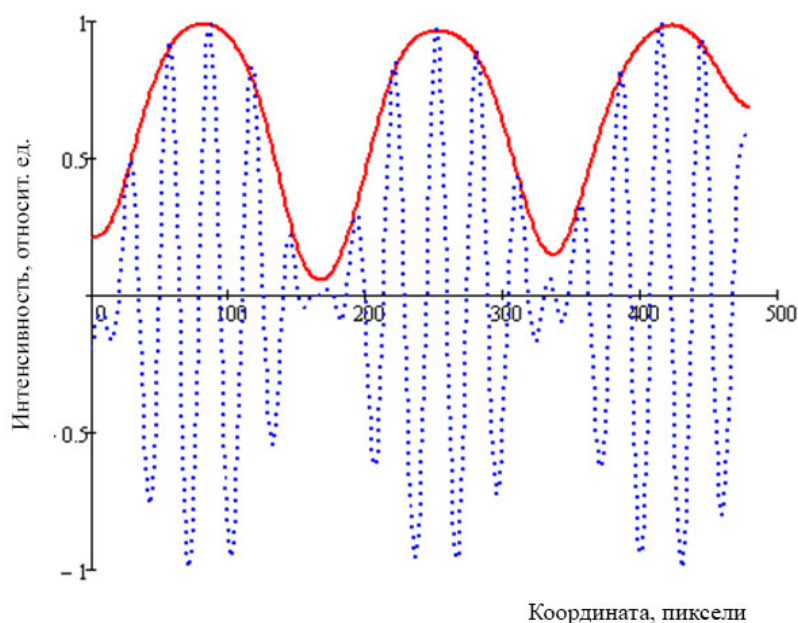


Рис. 8. Огибающая после вычитания полос

Период огибающей составил 2,238 мкм. Подставляя это значение в формулу для вычисления расстояния, получим $z = 267$ мм. Погрешность составила 3 мм или 1,1 %.

Заключение

Предложен способ измерения расстояния, основанный на использовании двух источников излучения с разными длинами волн. Вычитание интенсивностей двух дифракционных картин друг из друга позволяет получить сигнал (огибающую биений), соответствующий дифракции на щели эквивалентной длине волны, которая в несколько раз больше длин волн источников излучения. Точностный анализ показал, что увеличение длины волны, используемой при измерениях, позволяет уменьшить значения передаточных коэффициентов некоторых первичных погрешностей, следовательно, и суммарную погрешность измерения.

Для выделения огибающей сигнала был использован алгоритм, в основе которого лежит преобразование Гильберта-Хуанга.

Для проверки адекватности предложенного способа и математических моделей, их описывающих, на базе оптической скамьи ОСЦЛ-2 был собран макет установки. Проведенные измерения показали работоспособность предложенного способа и возможность его физической реализации. Экспериментально полученная погрешность находилась в пределах 1 % для измеренного расстояния до 300 мм. Алгоритм, основанный на преобразовании Гильберта, показал свою пригодность.

Таким образом, предложенный способ измерения расстояния может быть использован для создания бесконтактных устройств определения пространственного положения объектов в различных областях науки и техники.

Публикации

1. Киреевков В.Е., Иванов А.Н., Носова М.Д. Дифракционные методы контроля пространственного положения объектов // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 11. С. 78–82.
2. Киреевков В.Е., Иванов А.Н. Исследование возможности измерения дистанции дифракционным методом // Сборник трудов VIII международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2013». СПб., 2013. С. 263–265.
3. Киреевков В.Е. Измерение положения объекта двухволновым дифракционным способом // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 24–25.

4. *Киреев В.Е.* Исследование возможности измерения дистанции дифракционным методом // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 28–29.

Литература

1. *Байбаков А.Н., Ладыгин В.И., Пастушенко А.И. и др.* Лазерные триангуляционные датчики положения в промышленных системах контроля // *Автометрия*. 2004. № 2. С.105–113.
2. *Алехин В., Мирошниченко И., Серкин А.* Лазерный интерферометр для измерения перемещений // *Наноиндустрия*. 2010. № 2. С. 38–41.
3. *Сухарев И.П., Ушаков Б.Н.* Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. М., 1969. – 208 с.
4. *Теокарис П.* Муаровые полосы при исследовании деформаций. М., 1972. – 336 с.
5. *Германович О., Лиференко В., Лебедев С.* Преобразование Гильберта в среде LabVIEW // *Компоненты и технологии*. 2012. № 2. С. 122–124.
6. *Huang N.E., Shen Zh., Long S.R.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Proceedings of the Royal Society of London A*. 1998. Vol. 454. No 1971. P. 903–995.
7. *Ежов Е.Г., Земцов А.Ю., Степанов С.А.* Разработка методов и программных средств подавления шумов в интерферограммах на этапе предварительной обработки // *Компьютерная оптика*. 2005. Вып. 28. С. 140–144.



Книга Екатерина Викторовна
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра машинного проектирования бортовой электронно-вычислительной аппаратуры
E-mail: ekovinskaya@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ТЕСТИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Е.В. Книга

Научный руководитель – доцент И.О. Жаринов

Цели работы – разработка методики и алгоритмов тестирования бортовой цифровой вычислительной системы. Для этого были решены задачи повышения показателей надежности, определения принципов организации параллельного непрерывного контроля мультипроцессорных многомодульных бортовых цифровых вычислительных систем и определения структуры автоматизированного рабочего места для проведения тестирований аппаратуры в процессе производства.

Современные бортовые цифровые вычислительные системы (БЦВС) представляют собой сложные технические объекты, относящиеся по системе Флинна к классу мультипроцессорных систем с множественным потоком команд и множественным потоком данных и состоящие из набора конструктивно-функциональных модулей (КФМ), связанных между собой в единую локальную сеть [1–3]. Номенклатура КФМ представляет собой следующие разновидности модулей: вычислительный (МВ); графический (МГ); ввода-вывода (МВВ); постоянной памяти (МПП); модуль-коммутатор (МК) и модуль напряжения (МН).

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

Отказ БЦВС создает предпосылки к возникновению летного происшествия, поэтому необходимо осуществлять контроль работоспособности (тестирование) БЦВС во время полета на предмет выявления неисправностей и при отказе отдельного КФМ реконфигурировать БЦВС за счет реализованного в системе аппаратно-программного резервирования.

Алгоритм работы БЦВС представлен на рис. 1. После подачи питающих напряжений на БЦВС проводится тест начального включения каждого модуля из двух подсистем. Проводится полный тест оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), тестируется постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) путем подсчета и сравнения контрольных сумм и устройств ввода-вывода. Результат о прохождении теста выдается в МПП, где записывается в журнал. При неудачном прохождении теста начинается реконфигурация системы при имеющихся аппаратных ресурсах. Если ресурсов в системе нет, то снимается сигнал исправности, и БЦВС считается отказавшей. При успешном прохождении теста устанавливается сигнал исправности, и из МПП начинается загрузка функционального программного обеспечения (ФПО) для каждого функционального модуля в системе. После полной загрузки ФПО из МПП поступает команда на инициализацию выполнения ФПО.

После выполнения каждого цикла ФПО проводится тестовый контроль в фоновом режиме. Режим выполнения теста определяется разовой командой (РК) «автоматический контроль». При ее наличии тест проводится в расширенном режиме, при отсутствии – в стандартном.

В расширенном тестовом режиме контентная информация из каждого модуля заносится в энергонезависимое ПЗУ и проводится тест, который включает в себя полный тест ОЗУ, тест ПЗУ на подсчет контрольных сумм, тест процессора, системы прерываний и устройств ввода-вывода. В стандартном режиме тест включает в себя тест ОЗУ лишь в выделенной области, которую не затрагивает ФПО, тест ПЗУ на подсчет контрольных сумм и тест системы команд процессора. После завершения теста в обоих режимах информация о результате выдается в МПП, где заносится в журнал. При успешном завершении теста выставляется сигнал исправности и БЦВС приступает к выполнению следующего цикла ФПО. При неудачном завершении теста начинается реконфигурация.

Алгоритм работы БЦВС в режиме реконфигурации зависит от распределения задач на модули. Возможные варианты распределения задач:

- назначение одного функционального задания авионики (программного приложения) на один вычислительный ресурс БЦВС;
- назначение нескольких функциональных заданий авионики (программных приложений) на несколько вычислительных ресурсов БЦВС;
- назначение одного функционального задания авионики (программного приложения) на несколько вычислительных ресурсов БЦВС.

Решение задачи о назначении приложений осуществляется аппаратно-программными средствами БЦВС путем организации логических протоколов взаимодействия между КФМ по внутреннему коммутируемому каналу связи SpaceWire.

Реконфигурация при назначении каждой задачи на индивидуальное функциональное устройство возможна только при наличии модулей в резерве. Если модуль в резерве есть, ему передается ФПО отказавшего модуля, модифицируется ФПО остальных работающих модулей, и БЦВС возвращается к выполнению своей задачи. Если модуля в резерве нет, то снимается сигнал исправности БЦВС, и БЦВС считается отказавшей.

Реконфигурация при назначении нескольких задач на функциональный модуль возможна не только при наличии резервного, но также в случае, если у работающих модулей имеются дополнительные ресурсы для выполнения задач, которые выполнял отказавший модуль. Тогда задачи отказавшего модуля распределяются между работающими.

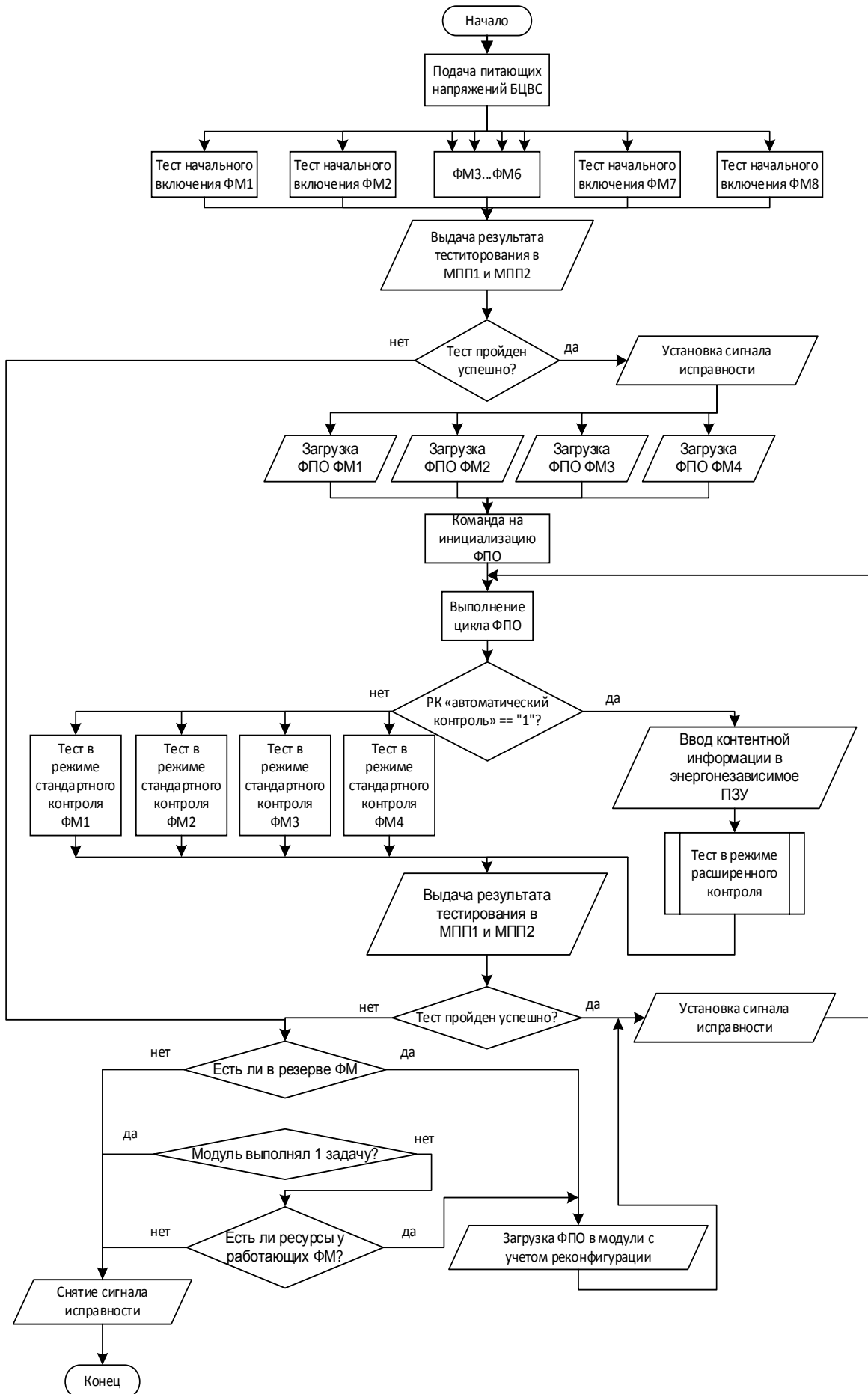


Рис. 1. Алгоритм работы БЦВС

Реконфигурация при назначении задач, когда один модуль выполняет одну задачу, а три других выполняют по несколько задач, зависит от того, какой из модулей отказал. Если отказал тот модуль, который выполнял одну задачу, то реконфигурация возможна только при наличии резервных модулей. Если отказал тот модуль, который выполнял несколько задач, то реконфигурация также возможна при наличии дополнительных ресурсов на оставшихся двух модулях, выполняющих несколько задач. В таком случае эти два модуля начинают выполнять задачи отказавшего модуля.

После проведения реконфигурации алгоритм работы БЦВС состоит в следующем: при положительном реконфигурировании выставляется сигнал исправности и БЦВС возвращается к выполнению ФПО. При неудачном – снимается сигнал исправности, и БЦВС считается отказавшей.

Структура БЦВС ИМА позволяет отказаться от проведения внутреннего контроля каждого модуля и организовать инициирование внешнего функционального контроля, который повышает уровень полноты контроля за счет использования различных участков памяти, каналов ввода-вывода, сетевого интерфейса. При этом для организации внешнего контроля схема проверки, состоящая из одного модуля, тестирующего соседний модуль, оказывается недостаточной. Необходимо, чтобы каждый модуль проходил три фазы проверки от разных модулей одной подсистемы БЦВС. Затем результат тестирования определяется по схеме мажорирования результатов тестирования КФМ во всех трех фазах проверки.

Таким образом, каждый КФМ иницирует тестирование по определенному параметру для трех других модулей подсистемы. Причем все три фазы тестирования основаны на выполнении функциональной задачи, исполняемой в полете этим КФМ. Три ФМ передают проверяемому КФМ разные данные, которые модуль обрабатывает, затем получает из них результат для каждого из предъявленных тестов и передает его обратно тому модулю, который инициировал тест. Алгоритм прохождения такого контроля одним ФМ представлен на рис. 2.

Параллельно с этим при получении сторонними модулями, которые инициировали тест для ФМ1, то есть ФМ2, ФМ3 и ФМ4, результатов от ФМ1 эти модули сравнивают их с эталонным, который находится в их ячейках памяти, и направляют результат – исправен или неисправен модуль ФМ1 – модулю-арбитру. На рис.3 представлен алгоритм тестирования только для одного модуля, остальные проходят тестирование аналогичным образом, в том числе и модуль-арбитр.

Таким образом, все ФМ в одной подсистеме БЦВС проходят по три фазы тестирования, инициированные разными сторонними модулями одной подсистемы, и иницируют тестирование трех других ФМ.

После того как модуль-арбитр получает все результаты прохождения всеми ФМ тестов, МПП анализирует эти результаты и либо формирует интегральный сигнал исправности БЦВС, либо (при обнаружении отказавшего модуля) запускает процедуру реконфигурации вычислительной системы.

Алгоритм анализа модулем-арбитром результатов выполнения тестов для одного функционального модуля представлен на рис. 3. Арбитр анализирует данные тестов от трех модулей, иницирующих тест для одного функционального модуля, и если от двух из них была получена информация о несовпадении контрольных значений выполнения тестов, модуль считается отказавшим. Результаты тестирования для остальных функциональных модулей анализируются по аналогичной схеме.



Рис. 2. Алгоритм работы функционального модуля в режиме тестового контроля (пример тестирования для одного ФМ)

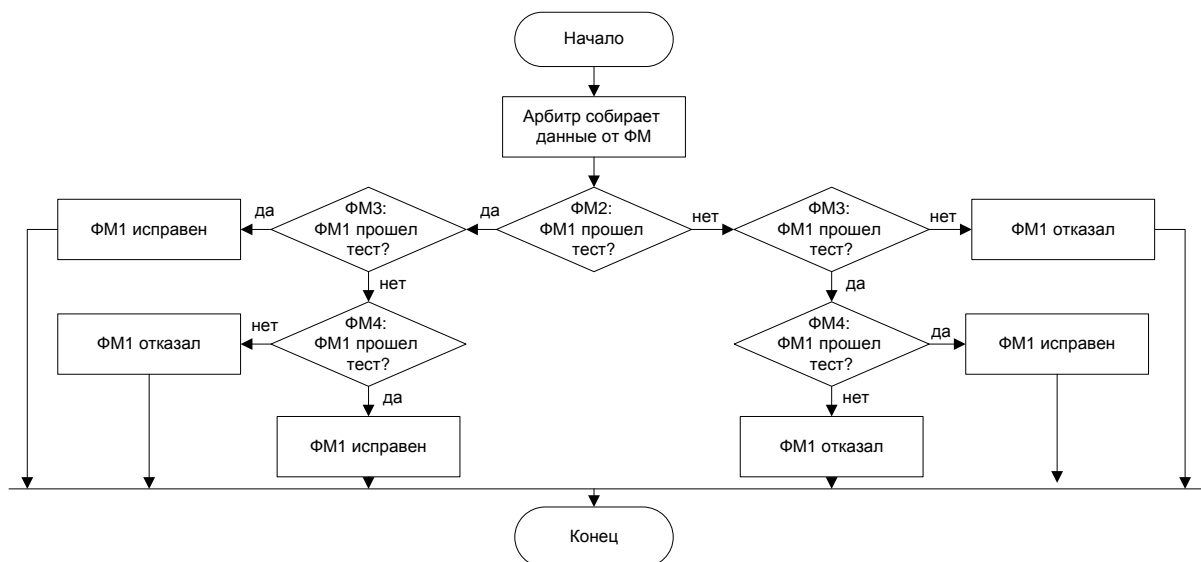


Рис. 3. Алгоритм анализа результатов тестирования для одного функционального модуля модулем-арбитром

Заключение

В работе представлен обобщенный алгоритм работы бортовой цифровой вычислительной системы, а также алгоритм ее работы в процессе реконфигурации.

Алгоритм работы системы в период реконфигурации зависит от распределения задач на конструктивно-функциональные модули в составе системы. Реконфигурация возможна только при наличии дополнительных ресурсов на уже используемых модулях или при наличии модулей в резерве.

Реконфигурация системы позволяет отказаться от резервирования на уровне всех систем и заменить его на резервирование на уровне составляющих системы – конструктивно-функциональных модулей, что позволяет уменьшить используемое оборудование на летательном аппарате, а значит уменьшить его вес и габариты, а также значительно повысить надежность систем.

Публикации

1. Захарова О.Л., Кирсанова Ю.А., Книга Е.В., Жаринов И.О. Алгоритмы и программные средства тестирования бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики // Информационно-управляющие системы. 2014. № 3 (70). С. 19–29.
2. Книга Е.В., Жаринов И.О. Алгоритм тестирования мультипроцессорных многомодульных бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики // Вестник науки Сибири. 2014. № 2 (12). С. 107–114.

Литература

1. Гатчин Ю.А., Жаринов И.О. Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики. – М., 2010. – 224 с.
2. Парамонов П.П., Жаринов И.О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 1–17.
3. Книга Е.В., Жаринов И.О., Богданов А.В., Виноградов П.С. Принципы организации архитектуры перспективных бортовых цифровых вычислительных систем в авионике // Там же. С. 163–165.



Князев Сергей Николаевич
Факультет естественнонаучный
Кафедра информационных технологий в гуманитарной сфере
E-mail: sergey.n.knyazev@gmail.com

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, АЛГОРИТМОВ И ПРОТОТИПА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНФОРМАЦИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ БЕЛКОВ

С.Н. Князев

Научный руководитель – доцент Ю.Б. Порозов

Моделирование изменения структуры молекулы белка в процессе изменения ее биологической функции – нужная, но вычислительно сложная задача. Ее решение позволяет аккуратнее предсказывать химическое связывание белковых молекул, что может оказаться

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

полезным, например, при компьютерной разработке лекарственных средств. Но до сих пор не существует достаточно точных методов способных быстро анализировать длительные (длящиеся более 1 мкс) движения. Например метод молекулярной динамики не справляется с такой задачей из-за сложности вычислений. Поэтому в последнее время набирают популярность методы приближенного моделирования, которые способны работать при ограниченных вычислительных ресурсах. Однако из-за упрощения представления физических процессов последние имеют ряд существенных недостатков. В данной работе предложен новый метод моделирования конформационной подвижности, который несмотря на то, что использует приближенное моделирование – выгодно отличается от аналогов тем, что лучше учитывает физико-химические особенности молекул. Результаты моделирования позволяют утверждать, что он способен предсказывать движения белка, которые действительно возможны в природе.

Модель конформационной подвижности

Белковая молекула может быть рассмотрена как набор аминокислот образующих цепочку, которая может изгибаться и принимать различные формы (конформации). Обычно белок находится в одной из нескольких конформаций, для которых характерно низкое значение внутренней энергии. Белок может переходить из одной конформации в другую под воздействием окружающей среды. Такой переход называется трансформацией.

Модель белковой конформации

При рассмотрении белковой молекулы часто различают основную цепь, состоящую из атомов N^i , C_α^i , C^i , соединенных последовательно ковалентными связями (рис. 1), и боковые цепи, представляющие собой группы атомов, которые присоединены к C_α^i , а их состав зависит от конкретной аминокислоты. Конформационная подвижность белковых молекул обусловлена подвижностью торсионных углов φ_i и ψ_i в основной цепи молекулы белка. Торсионные углы ω_i между ковалентными связями $C_\alpha^i - C^i$ и $N^{i+1} - C_\alpha^{i+1}$ в процессе движения белка изменяются мало и обычно принимают значения, близкие к 0 или 180° . Минимальным изменениям также подвергаются как длины ковалентных связей, так и значения валентных углов α_i (рис. 2). Они возможны лишь в узком интервале допустимых значений, что обуславливается физико-химическими свойствами ковалентных связей.

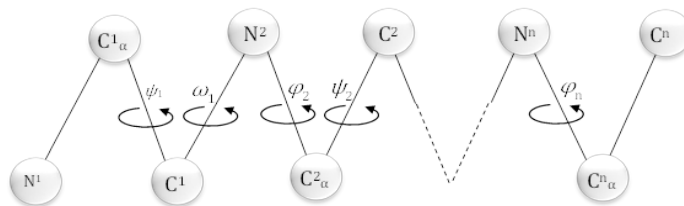


Рис. 1. Атомы и торсионные углы основной цепи белка

Как ранее было предложено Michael Levitt [1], будем применять coarse-grained представление белковой молекулы и использовать для этого только атомы основной цепи N^i ; C_α^i ; C^i , а атомы боковых цепей будут учитываться через изменение характеристик соответствующих атомов C_α^i основной цепи.

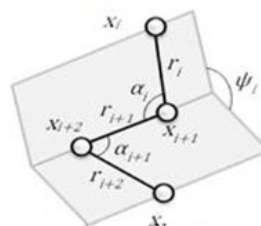


Рис. 2. Длины связей, валентные и торсионный углы в конформации белковой молекулы

Учитывая сказанное, разумным будет построить такую модель конформации белка, которая будет зависеть не от декартовых координат ее атомов, а от значений длин ковалентных связей r_i , валентных углов α_i , а также от значений торсионных углов ψ_i , φ_i и ω_i . Пусть $x_i \in \mathbb{R}^3$ представляет собой вектор декартовых координат i -го атома основной цепи конформации. Тогда конформация будет задана как вектор всех атомов основной цепи белка $(x_i)_{i=1}^n$. Строим конформационную модель, как набор из трех векторов: r_i – вектор длин связей, α_i – вектор валентных углов и ψ_i – вектор торсионных углов :

$$C = \{(r_i)_{i=1}^{n-1}, (\alpha_i)_{i=1}^{n-2}, (\psi_i)_{i=1}^{n-3}\}. \quad (1)$$

Длина связи r_i – это длина отрезка, соединяющего точки x_i и x_{i+1} . Валентные углы α_i – это планарный угол, сформированный точками x_i , x_{i+1} и x_{i+2} . Торсионные углы ψ_i – двугранный угол между двумя плоскостями, образованными тройками точек (x_i, x_{i+1}, x_{i+2}) и $(x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3})$. Детали проиллюстрированы на рис. 2. Значения r_i , α_i , и ψ_i вычисляются по выражениям:

$$r_i = \|x_{i+1} - x_i\|, \quad (2)$$

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left(\frac{\Delta x_i \cdot \Delta x_{i+1}}{\|\Delta x_i\| \|\Delta x_{i+1}\|} \right), \quad (3)$$

$$\psi_i = \text{atan2}(\|\Delta x_{i+1}\| \Delta x_i \cdot N_{i+1}, N_i \cdot N_{i+1}), \quad (4)$$

где: $\|\cdot\|$ – евклидова норма; $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$; $N_{i+1} = \Delta x_i \times \Delta x_{i+1}$.

Декартовы координаты конформации атомов могут быть восстановлены из модели с использованием метода описанного Jerod Parsons и др. [2].

Трансформационная модель белка

Если заданы две конформации, то трансформация может быть представлена, как упорядоченный набор конформаций, где первая и последняя из них являются заданными. Таким образом промежуточные конформации представляют собой пути, которые проходят атомы от позиций представленных в первой конформации в позиции, представленные в последней.

Пусть m – общее число конформаций в трансформационной модели, включая заданные, тогда в модели число промежуточных конформаций $m-2$. Будем обозначать j -ю конформацию как C^j , декартовы координаты атомов – x_i , длины связей – r_i , валентные углы – α_i , а торсионные углы – ψ_i , принадлежащие j -й конформации будут обозначаться как x_i^j , r_i^j , α_i^j , и ψ_i^j соответственно.

Трансформация T белка из конформации C^1 в конформацию C^m с $m-2$ промежуточными конформациями представлена следующей моделью:

$$T = (C^j)_{j=1}^m = \left(\left\{ (r_i^j)_{i=1}^{n-1}, (\alpha_i^j)_{i=1}^{n-2}, (\psi_i^j)_{i=1}^{n-3} \right\} \right)_{j=1}^m. \quad (5)$$

Значения длин связей промежуточных конформаций r_i^j , $j = 2 \dots m-1$ определяются посредством интерполирования значений между r_i^1 и r_i^m . Значения валентных α_i^j и торсионных углов ψ_i^j , $j = 2 \dots m-1$ вычисляются посредством круговой интерполяции между валентными углами α_i^1 и α_i^m , и соответственно торсионными ψ_i^1 и ψ_i^m .

Восстановление декартовых координат трансформационной модели происходит в два этапа. Сначала просто восстанавливаем декартовы координаты для каждой конформации в трансформации. Затем атомы каждой конформации, начиная со второй, выравниваем относительно предыдущей используя при этом алгоритм Кабша [3] так, чтобы сумма квадратов расстояний d_i между атомами альфа-углеродов C_α^i была минимальной (6).

$$\sum_{i=1}^n d_i \rightarrow \min. \quad (6)$$

Задача получения оптимальной трансформации

Даны две конформации одной и той же белковой молекулы (обычно это пара ее стабильных конформаций), требуется найти оптимальное движение между ними. Представим критерий, который оценивает энергию, необходимую для трансформации T , запишем его в виде модели:

$$f(T) = \sum_{i=1}^n M_i \left(\sum_{j=1}^{m-1} \|x_i^{j+1} - x_i^j\| \right)^2, \quad (7)$$

где M_i – масса атомов для N^i и C^i атомов и сумма масс атомов боковой цепи вместе с массой атома углерода для C_α^i атомов. Функция может быть рассмотрена, как общая кинетическая энергия, необходимая для перемещения атомов из позиций первой конформации C^1 в позиции последней конформации C^m . Ожидаемо, что наилучшая трансформация та, которая имеет наименьшее значение функции. Также следует отметить, что функция f зависит от торсионных углов ψ_i^j промежуточных конформаций. Таким образом мы имеем следующую оптимизационную задачу:

$$f(T) \rightarrow \min_{\psi_i^j}, \quad (8)$$

где $i = 1, 3, 4, 6, \dots, n-3$, $i = 2, 3, \dots, m-2$ и $-\pi \leq \psi_i^j < \pi$.

Алгоритм поиска оптимальной трансформации

Задача (8) решается с помощью алгоритма, состоящего из следующих шагов.

1. Нахождение петель на основе круговой разности между соответственными торсионными углами из начальной и конечной конформаций.
2. Поиск различных путей круговой интерполяции торсионных углов петель.
3. Оптимизация петель в соответствии с моделями (5) и (7) используя алгоритм внутренней точки [4].
4. Фильтрация петель. Отбрасываем те петли, в которых есть атомы, сближающиеся более чем на допустимую величину R .
5. Получение исходной трансформации белка целиком путем интерполяции торсионных углов по кратчайшему пути. Встраивание петель в исходную трансформацию.
6. Оптимизация трансформации с использованием алгоритма внутренней точки.

Выделение петель

Интересны наиболее изменчивые участки белка, которые будем выделять для оптимизации отдельно от всего белка, назовем их петлями. Выделение петель происходит в несколько этапов:

– выделяем аминокислотные остатки L_i , у которых есть торсионный угол, с круговой разницей между первой и последней конформацией, более чем θ :

$$B = \{L_i : |\psi_i^m - \psi_i^1| > \theta \wedge |\varphi_i^m - \varphi_i^1| > \theta\};$$

– если между L_i и L_j меньше k аминокислот, то L_i и L_j входят в петлю, вместе с аминокислотами, их разделяющими;

– трем крайним атомам с каждой стороны каждой петли присваиваем массу $M^b \gg M_i$.

Генерация набора начальных приближений петли

Углы ψ_i белковой молекулы, в процессе трансформации, могут двигаться как по часовой стрелке, так и против. Поэтому движение каждого торсионного угла можно интерполировать по обоим направлениям. Представим направление движения одного угла в виде бинарной переменной d , которая принимает значения: 0 – движение по часовой стрелке, 1 – против. Тогда направления движений всех углов модели задается вектором $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ Всего получается 2^n вариантов комбинаций направлений движений, а следовательно столько же начальных приближений.

Допустим, что следует перебирать направления не для всех углов, а только для тех, у которых в процессе движения угол меняется на величину, близкую к 180° . Т.е. для перебора берутся те углы, для которых справедливо:

$$|\psi_i^m - \psi_i^1| > \pi - \varepsilon \quad (9)$$

В итоге для каждой петли получается несколько начальных приближений трансформаций.

Результаты

Метод разработан таким образом, чтобы генерируемые им траектории были допустимы в реальности. Алгоритм позволяет изменять только торсионные углы основной цепи молекулы белка, чтобы обеспечивать ее основные физико-химические свойства. Реализация алгоритма способна отсеивать траектории, в которых присутствуют критические сближения атомов, что не допускает выход энергии связей за допустимые пределы. Дополнительная минимизация внутренней энергии позволяет обеспечить траектории приемлемыми энергетическими характеристиками. Дополнительный перебор дуг интерполяции вращений торсионных углов позволяет значительно расширить область исследования конформационного пространства. Предварительное выделение петель позволяет более подробно исследовать области конформационного пространства, в которых наиболее вероятно сосредоточены движения. Новый метод позволяет расширить класс движений, доступных для исследования существующими методами моделирования.

На основе приведенных методов и алгоритмов создан прототип программного обеспечения, который реализован в виде Matlab скриптов для среды Matlab R2012b. Был использован алгоритм оптимизации внутренней точки реализованный в Matlab Optimization Toolbox. Листинг кода доступен по запросу автору через email. Метод протестирован на ряде белков, изучение динамики которых представляет научный интерес (Табл. 1). Он был применен для моделирования конформационной подвижности белков, указанных в Табл. 1.

Таблица 1

Белковые структуры, используемые для тестирования алгоритма

Название белка	Переход	Число аминокислот	RMSD	Характеристики модели перехода
Убиквитин-подобный белок 2LJI	2LJI:08→2LJI:16	66	2,41Å	рис. 3а
	2LJI:15→2LJI:19	66	3,19Å	рис. 3б
Succinic semialdehyde dehydrogenase	2W8N→2W8O	487	1,12Å	рис. 3в
acetyl-CoA acetyltransferase	reduced→oxidized	392	2,74Å	рис. 3г

В ходе тестирования смоделированы трансформации, каждая из которых была верифицирована в *Discovery Studio* [5]. В процессе тестирования было выявлено, что энергетические характеристики движений находятся в допустимых диапазонах и, следовательно, их существование допускается в природе. На рис. 3 показаны характеристики перехода белков после минимизации функционала.

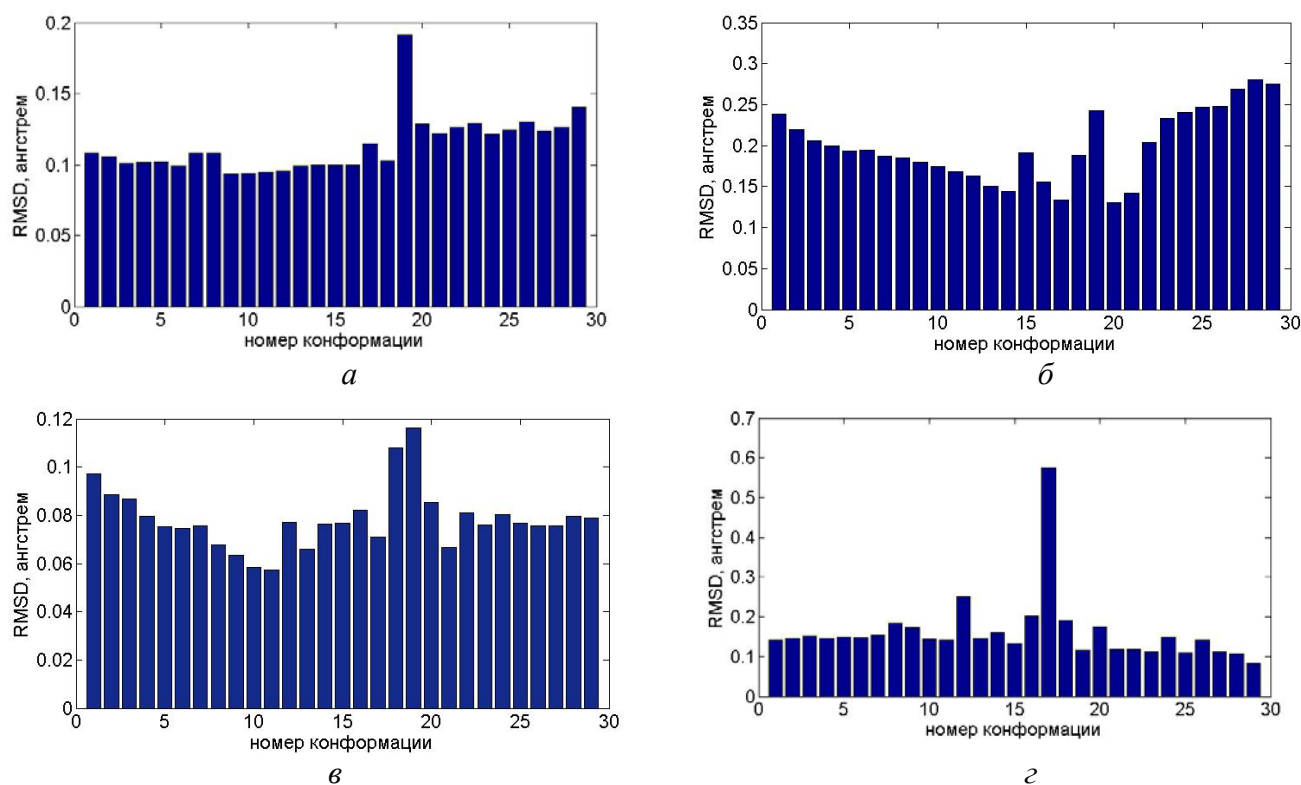


Рис. 3. Среднеквадратическое отклонение (RMSD) характеристики перехода протестированных белков: а – 2LJI:08→2LJI:16; б – 2LJI:15→2LJI:19; в – 2W8N→2W8O; г – acetyl-CoA acetyltransferase (reduced→oxidized)

Публикации

1. Knyazev S., Tarakanov S., Kuznetsov V., Koucheryavy Y., Stepanov E., Porozov Y. Coarse-grained model of protein interaction for bio-inspired nano-communication // Proceedings of the 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2014. P. 260–262.
2. Buzdalov M., Knyazev S., Porozov Y. Protein conformation motion modeling using sep-CMA-ES // Proceedings of International Conference on Machine Learning and Applications. 2014. P. 35–40.
3. Tamazian G., Knyazev S., Stepanov E., Porozov Y. Simulation of protein conformational motion based on its coarse-grained protein representation // Proceedings of the 12th International Symposium CMBBE. 2014. P. XX–XX.

Литература

1. Levitt M. A simplified representation of protein conformations for rapid simulation of protein folding // Journal of Molecular Biology. 1976. Vol. 104. No 1. P. 59–107.
2. Holmes J.B., Rojas J.M., Tsai J., Strauss C.E., Parsons J. Practical conversion from torsion space to cartesian space for in silico protein synthesis // Journal of Computational Chemistry. 2005. Vol. 26. No 10. P. 1063–1068.
3. Kabsch W. A solution of the best rotation to relate two sets of vectors // Acta Crystallographica Section A. 1976. Vol. 32. No 5. P. 922–923.
4. Hribar M.E., Byrd R.H., Nocedal J. An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming // SIAM Journal on Optimization. 1999. Vol. 9. No 4. P. 877–900.
5. Accelrys Software Inc. Discovery Studio Modeling Environment. Release 3.1. San Diego, 2012.
6. Stepanov E.O., Porozov Y.B., Koshevoy A.A. Method of prediction and optimization of conformational motion of proteins based on mass transportation principle // Biophysics. 2014. Vol. 59. No 1. P. 28–34.



Кобыда Елена Викторовна
Факультет пищевой инженерии и автоматизации
Кафедра техники пищевых производств и торговли
E-mail: elenakobyda@yandex.ru

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ПРЕССОВАНИИ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Е.В. Кобыда

Научный руководитель – профессор Е.И. Верболоз

Целью работы является повышение эффективности процесса прессования макаронных изделий, увеличение их прочности и срока хранения готовых изделий.

Задачи исследования:

- провести анализ существующих методов и оборудования для прессования макаронных изделий;
- выявить количественные закономерности воздействия ультразвука на процессы релаксации и ползучести макаронного теста;
- разработать математическую модель функционирования макаронного пресса с ультразвуковым устройством;
- провести экспериментальные исследования рабочего процесса модернизированного макаронного пресса;
- обосновать техническое решение макаронного пресса с излучателем ультразвука.

Для исследования влияния режимов прессования на характеристики макаронных изделий и энергетику прессования была использована экспериментальная установка (рис. 1). В качестве технологической оснастки использовалась стальная цилиндрическая зажимная гайка, связанная болтовым соединением с концентратором ультразвукового устройства Волна – М УЗТА-1/22-0Рв. К матрице, закрепленной зажимной гайкой, в радиальном направлении подводились ультразвуковые колебания, а вдоль перпендикулярной оси одновременно прикладывалось статическое давление прессования P . Следовательно, матрица являлась частью акустического волновода, а собственная резонансная частота ультразвуковых колебаний всей акустической системы составляла 20 кГц. Интенсивность ультразвукового воздействия на прессуемое тесто от вибрирующих фильер матрицы вручную задавалась выходной электрической мощностью ультразвукового генератора.

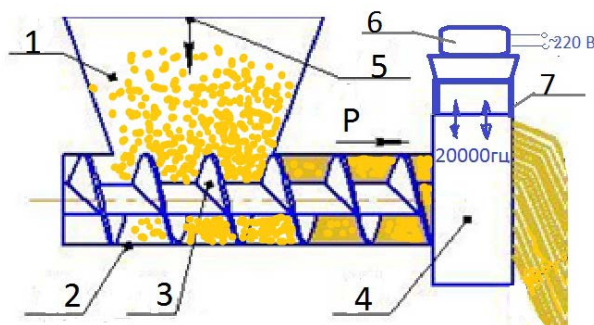


Рис. 1. Схема ультразвукового пресса с радиальным подведением колебаний: 1 – бункер, 2 – шнековая труба, 3 – шнек, 4 – матрица с накладной гайкой, 5 – тесто, 6 – магнитострикционный преобразователь, 7 – экспоненциальный ультразвуковой концентратор, P – давление перед фильерами матрицы

Для сравнения макаронные изделия прессовались также обычным одноосным статическим прессованием (без ультразвукового воздействия). Даже без использования инструментальных методов видны различия: образцы, приготовленные прессованием с использованием ультразвукового воздействия на тесто, более гладкие, блестящие и однородные на срезе.

На этом этапе основное внимание уделялось определению снижения общих энергетических затрат пресса с ультразвуковым устройством (до 30 %) и обнаружению традиционных дефектов (поры, включения), присущих промышленным методам прессования. Выявлено, что при соответствующем подборе мощности ультразвукового устройства энергетические затраты пресса можно существенно снизить, а обнаруженные в образцах дефекты устраняются выбором условий и оптимизацией режимов докавитационного прессования.

Применение ультразвуковых генераторов и излучателей приводит к повышению эффективности работы установки [1]. Существующие методики расчета ультразвуковых волноводных систем требуют уточнения влияния нагрузки, что возможно при дополнительных исследованиях на моделях макаронного пресса.

На кафедре ТППиТ Университета ИТМО на лабораторной установке проведен эксперимент по прессованию макаронных изделий в поле ультразвука (20000 Гц) [2]. Он показал, что теоретического материала для глубокого понимания физической сущности процесса и методик снижения энергетических затрат недостаточно. Объясняется это, в большей степени, отсутствием обобщающих данных теоретического и экспериментального характера такой технологии.

Проведенные исследования показали возможность уплотнения и значительной модификации макаронного теста при дозированной обработке его ультразвуком. Знакопеременная радиальная силовая составляющая акустического поля, перпендикулярная к пряди макарон, способствует «отжатию» поверхности формируемых изделий от стенок фильер и совместно с постоянно действующей силой от шнека позволяет транспортировать пряди без разрушения и налипания на выходе из фильер матрицы. Теоретически это позволяет уменьшить величину статической силы, необходимой для прессования, более чем в два раза. Наличие в макаронном тесте акустического поля увеличивает его пластичность и приводит к тому, что частицы муки, преодолевая силы упругости сжатого материала, осуществляют периодические трехмерные смещения. Равномерное уплотнение набухших и развернутых ранее в беспорядочные цепи глобул происходит в основном при продавливании через фильеры прядей макаронных изделий. Скорость введения теста в матрицу ограничивается температурой нагрева и допустимыми остаточными напряжениями, при которых макаронные изделия не разрушаются на выходе из матрицы и не изменяют размеры выше допустимых [2].

В экспериментальных и теоретических исследованиях были обобщены и изучены результаты имеющихся научных разработок в областях технологии и техники [2, 3]. Применялся общесистемный подход к описанию и изучению основных существенных факторов, оказывающих воздействие на качество макарон. При решении указанных задач использовались методы законов уплотнения материалов, теории ультразвуковых полей, динамики твердого тела, аналитико-численные методы с использованием пакета EXEL. Использовались методы планирования эксперимента, математической статистики, физического моделирования.

Заключение

Теоретические исследования показали, что положительные эффекты применения ультразвука при прессовании макаронного теста (снижение энергоемкости процесса и повышение прочности) объясняются интенсификацией процесса ползучести и релаксации в уплотняемом материале. Ультразвук вызывает уплотнение теста, уменьшает силы сцепления и трения в момент прохождения его через матрицу. Это приводит к увеличению,

по сравнению со статическим уплотнением, доли направленных и ориентированных по ходу движения теста структурных деформаций, уменьшению необходимых давлений и энергоёмкости процесса. Анализ показывает, что применение ультразвука при прессовании макаронных изделий может снизить энергоёмкость не менее чем в 1,4–1,5 раза. Ожидаемый экономический эффект за счет снижения затрат электроэнергии и повышения качества макаронных изделий составляет до 15–20 % [2]. Предлагаемая технология менее требовательна не только к качеству муки, но и позволяет использовать растительные добавки без снижения потребительских свойств изделий.

В настоящее время проводится модернизация действующей лабораторной установки с переводом ее на компьютерное программирование и автоматическую регистрацию показаний процесса прессования макаронных изделий.

Полученные результаты показали эффективность применения ультразвукового прессования макаронных изделий и необходимость дальнейшей оптимизации его режимов.

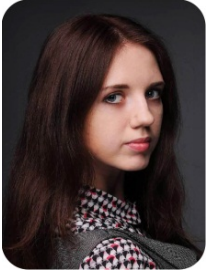
Публикации

1. *Кобыда Е.В., Верболоз Е.И., Антуфьев В.Т.* Обоснование эффективности прессования макаронных изделий в поле ультразвука [Электронный ресурс] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 4 (18). URL: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/10699.pdf> (дата обращения: 29.01.2015).
2. *Кобыда Е.В., Верболоз Е.И.* Эффективность прессования макаронных изделий с наложением ультразвука // Сборник трудов V Международной научно-практической конференции студентов «Науково-технічна творчість студентів з процесів і обладнання харчових виробництв». Вып. 5. Донецк, 2013. С. 204–206.
3. *Кобыда Е.В.* Ways to reduce energy and material costs when pasta pressing // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 4. СПб., 2013. С. 57.
4. *Кобыда Е.В.* Пути снижения энергетических и материальных затрат при прессовании макаронных изделий // Сборник тезисов докладов конгресса молодых учёных. Вып. 4. СПб., 2013. С. 56–57.
5. *Кобыда Е.В.* Интенсификация процессов прессования макаронных изделий в поле ультразвука // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 4. СПб., 2014. С. 92–94.
6. *Кобыда Е.В., Верболоз Е.И., Антуфьев В.Т.* Макаронный пресс с ультразвуковым излучателем [Электронный ресурс] // Хлебопродукты. 2014. № 2-14. С. 42–43. URL: <http://www.khleblogprod.ru/index.php/component/content/article/117-texts/zhurnaly-14-goda/02-14/1033-udk-637-5-makaronnyj-press-s-izluchatelem-ultrazvuka> (дата обращения: 29.01.2015).
7. *Кобыда Е.В., Верболоз Е.И., Вороненко Б.А., Вербицкий В.Н.* Поглощение ультразвука макаронным тестом при прессовании [Электронный ресурс] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 1 (19). URL: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/8709.pdf> (дата обращения: 29.01.2015).
8. *Кобыда Е.В., Верболоз Е.И., Пальчиков А.Н., Антуфьев В.Т.* Исследование разбухания макаронных прядей в процессе прессования в поле ультразвука [Электронный ресурс] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 2 (20). URL: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/10800.pdf> (дата обращения: 29.01.2015).
9. Патент на изобретение РФ № 2530999 «Макаронный пресс», опублик. 23.04.2013.

Литература

1. *Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Хмелёв С.С., Лебедев А.Н.* Ультразвуковой аппарат для интенсификации процесса прессования волокнистых материалов // Tenth international conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'09. – Новосибирск, 2009. С. 285–288.
2. Патент на изобретение РФ 2530999 «Макаронный пресс», опублик. 23.04.2013.
Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

3. Иванов В.С. Сверхвысокочастотный пресс макаронных изделий // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства». Вып. 14. Йошкар-Ола, 2012. С.141–143.



Ковалева Анна Сергеевна
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра прикладной и компьютерной оптики
E-mail: anyuta_kov@mail.ru

АНАЛИЗ АБЕРРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.С. Ковалева

Научный руководитель – профессор В.А. Зверев

Цель проекта – разработка метода расчета зеркальных, зеркально-линзовых и линзовых оптических систем с концентрическими поверхностями на основе анализа их абберационных свойств.

В ходе исследования был разработан инженерный метод расчета оптических систем концентрического зеркального, зеркально-линзового и линзового объективов, свободных от аббераций третьего порядка и от сферохроматической абберации для линзовых систем. Так, путем деформации второй по ходу луча поверхности плоскопараллельной пластинки, осевая точка которой совмещена с центром входного зрачка, как показано на рис. 1, можно компенсировать остаточную сферическую абберацию на поверхности наилучшего изображения. Полученная таким образом оптическая система известна как объектив Шмидта [1].

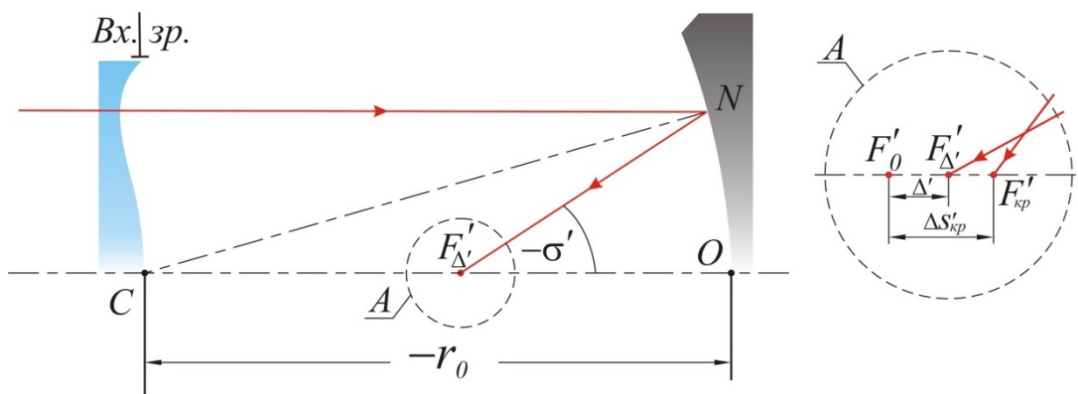


Рис. 1. Оптическая схема с коррекционной пластинкой: C – центр кривизны отражающей поверхности с радиусом кривизны r_0 ; F_{Δ}' – плоскость наилучшей установки изображения; σ' – задний апертурный угол; $\Delta s'$ – продольная сферическая абберация; Δ' – смещение так называемой плоскости наилучшей установки относительно плоскости параксиального изображения

Заметим, что луч, падающий на плоскопараллельную пластинку на зоне зрачка, проходит ее без отклонения, а следовательно, пересекает оптическую ось в пространстве

изображений в плоскости наилучшей установки изображения F'_Δ . Поскольку коррекция сферической аберрации осуществляется относительно именно этой плоскости, то роль осевой оптической силы пластинки, определяемой радиусом кривизны r_0 в вершине поверхности и показателем преломления n материала пластинки, практически сводится к смещению параксиального изображения, образованного отражающей сферой, в плоскости наилучшей установки. Кроме того, поскольку рассматриваемый луч проходит пластинку без изменений направления независимо от материала пластинки, то в точке его пересечения с оптической осью отсутствует хроматическая аберрация положения.

Добавим к одной отражающей поверхности еще одну таким образом, чтобы они были концентричны друг другу. Расположив центр входного зрачка системы в центре кривизны концентрических отражающих поверхностей, получим оптическую систему, длина которой в два раза короче подобной системы из одной отражающей поверхности. Однако сферическая аберрация третьего порядка в изображении, образованном рассматриваемой системой, не исправлена. Вновь добавляя пластинку Шмидта в центр входного зрачка, получим систему свободную от аберраций, длина которой равна фокусному расстоянию (рис. 2).

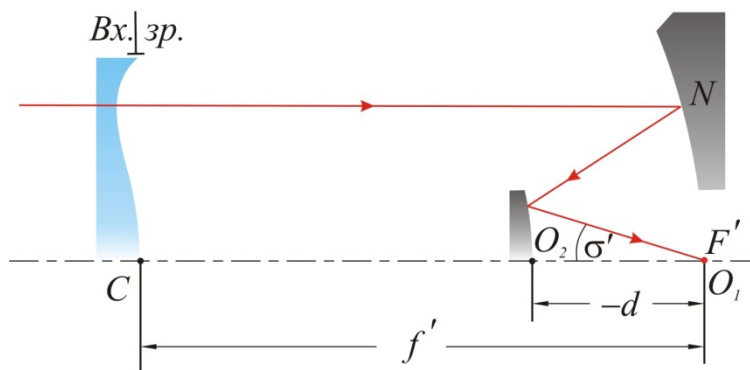


Рис. 2. Двухзеркальная оптическая система с коррекционной пластинкой: C – центр кривизны отражающей поверхности; f' – фокусное расстояние системы; σ' – задний апертурный угол; d – расстояние между отражающими поверхностями

Для коррекции сферической аберрации в рассмотренной двухзеркальной системе можно воспользоваться другим способом, который подробно отражен в статье [2].

Если взять преломляющую поверхность сферической формы, то последовательно преобразуя выражения для расчета хода луча через эту поверхность, получим формулу для коррекции сферической аберрации [1]:

$$\begin{aligned} \delta\sigma' = \sigma'_{k0} - \sigma'_k = & \frac{1}{6} \frac{m_1^3}{f_0'^3} - \frac{1}{6} n_1^3 m_1^3 \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1}{r_i^3} \left(\frac{1}{n_i^3} - \frac{1}{n_{i+1}^3} \right) + \\ & + \frac{3}{40} \frac{m_1^5}{f_0'^5} - \frac{3}{40} n_1^5 m_1^5 \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1}{r_i^5} \left(\frac{1}{n_i^5} - \frac{1}{n_{i+1}^5} \right) + \\ & + \frac{5}{112} \frac{m_1^7}{f_0'^7} - \frac{5}{112} n_1^7 m_1^7 \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1}{r_i^7} \left(\frac{1}{n_i^7} - \frac{1}{n_{i+1}^7} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\delta\sigma'$ – сферическая аберрация в угловой мере [3]; m_1 – высота падения луча на первую поверхность; n_i – показатель преломления i -ой поверхности; r_i – радиус кривизны i -ой поверхности; f_0' – фокусное расстояние оптической системы.

При этом оптическая сила концентрического объектива будет определяться выражением:

$$\varphi_0 = \frac{1}{f'_0} = n_1 \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1}{r_i} \left(\frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i+1}} \right). \quad (2)$$

Таким образом, система из уравнений (1) и (2) позволяет получить конструктивные параметры концентрической оптической системы, свободной от сферической aberrации.

Добавляя к системе уравнений выражение для коррекции хроматической aberrации положения: $\eta_{xp.n.} = m \sum_{i=1}^{i=k} \frac{\varphi_i}{n_i \cdot \mu_i} = 0$, получаем возможность рассчитать концентрический объектив свободный от сферохроматической aberrации.

Примеры концентрических оптических систем, полученных по предложенному методу, представлены на рис. 3, 4 и 5.

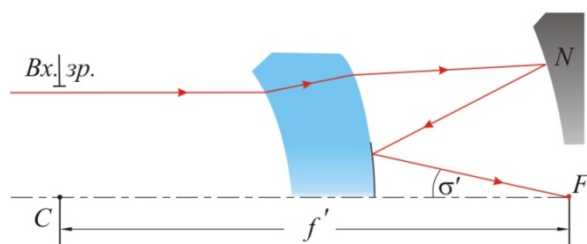


Рис. 3. Зеркально-линзовый объектив с концентрическим мениском

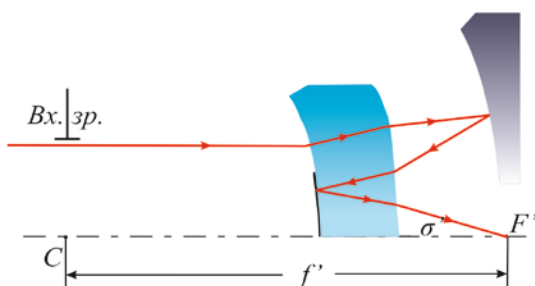


Рис. 4. Зеркально-линзовый объектив с тройным прохождением луча через концентрический мениск

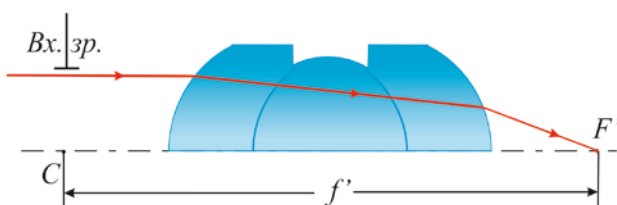


Рис. 5. Линзовый объектив с концентрическими поверхностями

Для того чтобы увеличить светосилу зеркально-линзовых оптических систем, представленных на рис. 3 и 4, заменим концентрический мениск апланатическим, то есть мениском, у которого отсутствует сферическая aberrация и кома. В такой системе астigmatизм изображения не зависит от толщины мениска, состоящего из апланатических поверхностей второго и первого вида [4]. Однако с увеличением толщины мениска уменьшается пецвалева кривизна поверхности изображения, что приводит к уменьшению продольных меридиональной и сагиттальной составляющих астigmatизма.

Рассматривая двухзеркальную систему, у которой отражающие поверхности в меридиональном сечении описываются уравнением второго порядка $y^2 = 2r_0z - (1 + \sigma_e)z^2$,

приходим к конечным формулам для коэффициентов деформации отражающих поверхностей σ_1 и σ_2 , при которых осуществляется апланатическая коррекция первичных aberrаций при заданных значениях поперечного увеличения V_0 и коэффициента центрального экранирования $k_{\text{э}}$:

$$\sigma_1 = \sigma_1^{\infty} - 8 \frac{V_0}{1 - V_0} a \left(\frac{1}{1 + V_0} - 2a^2 \right),$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{1 - V_0} \left(\frac{1 + V_0}{1 - V_0 b} \right)^3 \left[\sigma_2^{\infty} - V_0 b^3 (1 + 8c) \right],$$

где $\sigma_1^{\infty} = \frac{1 + 3k_{\text{э}}}{(1 + k_{\text{э}})^3} (5k_{\text{э}}^2 - 1)$, $\sigma_2^{\infty} = \frac{1 + k_{\text{э}}}{(1 + 3k_{\text{э}})^3} (5k_{\text{э}}^2 - 1)$, $a = \frac{k_{\text{э}}}{1 + k_{\text{э}}}$, $b = \frac{1 - k_{\text{э}}}{1 + 3k_{\text{э}}}$, $c = \frac{k_{\text{э}}}{(1 - k_{\text{э}})^3}$.

Рабочие расстояния со стороны предмета p и со стороны изображения p' в рассматриваемой системе будут соответственно равны:

$$p = (1 - V_0)^2 \left[\frac{2}{(1 + V_0)^2} - \frac{1}{V_0} \frac{k_{\text{э}}}{V_0 - k_{\text{э}}} \right],$$

$$p' = \frac{(1 - V_0)^2}{k_{\text{э}} - V_0}.$$

В своей монографии [5] профессор М.М. Русинов показал, что анастигматические зрачки отражающей поверхности, полученной вращением кривой конического сечения, расположены в геометрических фокусах образующей кривой поверхности. В работе [6] показано, что отражающие поверхности апланатического двухзеркального анастигмата образованы вращением кривых второго порядка, геометрические фокусы которых совмещены. Таким образом, отражающие поверхности двухзеркального апланатического анастигмата в частном случае образуют концентрическую систему сферических поверхностей или конфокальную систему двух параболоидов, а в общем случае – конфокальную систему двух отражающих эллипсоидов вращения.

Следует иметь в виду, что при строго апланатической коррекции aberrаций величина центрального экранирования зависит от числовой апертуры системы. При предельной числовой апертуре, ограниченной «естественной оправой» системы, коэффициент центрального экранирования $k_{\text{э}} = 1$.

Продолжая анализ концентрической системы из двух отражающих поверхностей, получим выражение:

$$V_0 = \frac{5k_{\text{э}}^2 - 1}{1 + 4k_{\text{э}} - k_{\text{э}}^2},$$

определяющее взаимосвязь поперечного увеличения изображения с величиной коэффициента центрального экранирования зрачка в двухзеркальной системе концентрических поверхностей, формирующей изображение, свободное от первичных сферической aberrации, комы и астигматизма.

Геометрические свойства концентрической системы отражающих поверхностей позволяют выразить коэффициенты в разложении aberrаций в степенной ряд через конструктивные параметры системы, что определяет принципиальную возможность коррекции aberrаций. Однако в случае концентрической системы из двух отражающих поверхностей, анализируя ход реального луча осевого пучка, можно получить точные выражения, определяющие взаимосвязь параметров системы с требуемым характером коррекции aberrаций широкого пучка лучей.

Так, проделывая необходимые преобразования в случае двухзеркальной концентрической системы получаем, что величина и характер изменения аберрации изображения при неизменных величинах углов σ и σ' определяются отношением радиусов кривизны поверхностей, которое при условии, что сферическая аберрация $\Delta\tilde{\gamma}' = 0$, равно:

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 2\frac{r_2}{r_1} \frac{1 - \cos^2 \frac{\sigma'+\sigma}{2} \cos \frac{\sigma'-\sigma}{2}}{1 - \cos^2 \frac{\sigma'+\sigma}{2}} + 1 = 0.$$

Заключение

На настоящем этапе разработан инженерный метод расчета оптических систем концентрических зеркального, зеркально-линзового и линзового объективов, свободных от аберраций третьего порядка и от сферохроматической аберрации для линзовых систем. Также были предложены рекомендации к выбору комбинации стекол для расчета концентрических линзовых объективов. Кроме того, в работе показаны примеры композиций оптических систем, представляющих собой самостоятельные объективы.

В результате выполненных исследований показано, что оптическая система, состоящая из двух отражающих поверхностей при апланатической и анастигматической коррекции первичных аберраций, представляет собой геометрически конфокальную, в частном случае – концентрическую, систему поверхностей. При этом получено выражение, определяющее зависимость поперечного увеличения изображения от величины коэффициента центрального экранирования по диаметру зрачка при сферической форме отражающих поверхностей. Выведена точная формула, позволяющая рассчитать сферическую аберрацию изображения, образованного концентрической системой поверхностей.

Публикации

1. Зверев В.А., Ковалева А.С., Тимошук И.Н. Анализ и параметрический синтез оптических систем зеркально-линзового концентрического объектива // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 1. С. 3–8.
2. Ковалева А.С. Оптехника апланатического мениска // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 24–25.
3. Ковалева А.С. Оптимизация параметров однолинзового планастигмата // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 25–26.
4. Ганеева А.В., Ковалева А.С., Точилина Т.В. Оптехника апланатического мениска // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 5 (87). С. 66–71.
5. Ганеева А.В., Ковалева А.С., Точилина Т.В. Композиция оптических систем круговой подсветки и обнаружения изменения светового поля // Сборник трудов VIII международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2013». Т. 1. СПб., 2013. С. 246–247.
6. Ковалева А.С. Метод расчета зеркальных, зеркально-линзовых и линзовых систем // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 11. С. 55–62.
7. Ковалева А.С. Анализ оптических систем из двух зеркальных поверхностей // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 25–26.

Литература

1. Зверев В.А., Ковалева А.С., Тимошук И.Н. Анализ и параметрический синтез оптических систем зеркально-линзового концентрического объектива // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 1. С. 3–8.
2. Ковалева А.С. Метод расчета зеркальных, зеркально-линзовых и линзовых систем // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 11. С. 55–62.

3. Попов Г.М. Концентрические оптические системы и их применение в оптическом приборостроении. М., 1969. – 136 с.
4. Гапеева А.В., Ковалева А.С., Точилина Т.В. Оплотехника апланатического мениска // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 5 (87). С. 66–71.
5. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике. М., 1973. – 296 с.
6. Зверева В.А. Оптическая система из двух зеркальных поверхностей // ОМП. 1968. № 10. С. 24–29.
7. Гаврилюк А.В., Зверев В.А. Параметрический синтез концентрической оптической системы из двух отражающих поверхностей // Оптический журнал. 1995. № 8. С. 44–48.
8. Зверев В.А. Основы геометрической оптики. СПб., 2002. – 218 с.
9. Грамматин А.П., Демидова Е.А., Зверев В.А., Романова Г.Э. Аберрационные свойства оптической системы из двух отражающих поверхностей сферической формы с компенсатором // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 4. С. 11–15.
10. Зверев В.А., Точилина Т.В. Основы оплотехники. Учебное пособие. СПб., 2005. – 293 с.
11. Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Часть 1. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. СПб., 2009. – 244 с.



Козлов Федор Алексеевич
Естественнонаучный факультет
Кафедра физики
E-mail: kozlovfedor@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СЕМАНТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Ф.А. Козлов

Научный руководитель – профессор С.К. Стафеев

Целью работы являлась создание комплексной методики оценки знаний пользователей системы дистанционного обучения. В основу исследования легло использование методов обработки семантических данных. Для автоматизации формирования взаимодействия между образовательным материалом и студентами были применены методы работы с открытыми связными данными и алгоритмы обработки естественного языка. В ходе исследования реализованы программные модули по сбору статистических данных о действиях студентов в системе. В результате были проанализированы знания студентов по предметным терминам электронного учебного курса. Разработанная методика показала гибкость применения для построения различных аналитических отчетов на основании полученной статистики и установленных метрик.

Для реализации поставленной цели выполнен комплекс задач по разработке методов и алгоритмов оценки знаний и по исследованию и развертыванию необходимого программного окружения.

Основными задачами научно-исследовательской работы являлись:

- исследование технологий открытых связных данных в системах дистанционного обучения;
- разработка методики построения архитектуры системы дистанционного обучения;

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

- разработка прикладных методов и алгоритмов по сбору учебных материалов;
- разработка прикладных методов и алгоритмов по адаптации учебных материалов;
- разработка метода взаимодействия системы с пользователями;
- разработка алгоритма вычисления оценки знаний пользователя по полученной статистике.

В результате реализации проекта разработан комплекс программных модулей и методических руководств для выполнения автоматизированной оценки знаний студента системы дистанционного обучения.

В рамках проекта разработана система дистанционного обучения, взаимодействующая с учебными материалами в формате открытых связанных данных [1]. Система основана на платформе Information Workbench [2], которая позволяет реализовывать приложения, позволяющие читать, собирать, редактировать и визуализировать открытые связанные данные.

Для сбора учебных материалов из внешних источников был разработан набор модулей, подключаемых к Information Workbench. Они позволяют собирать данные из электронных библиотек и хранилищ электронных тестов. Собранная информация преобразуется в семантический формат, что позволяет включать данные о литературе и тестах в электронный курс. Для хранения литературы была использована онтология VIVO [3]. Разработанная онтология для хранения электронных тестов представлена на рис. 1.

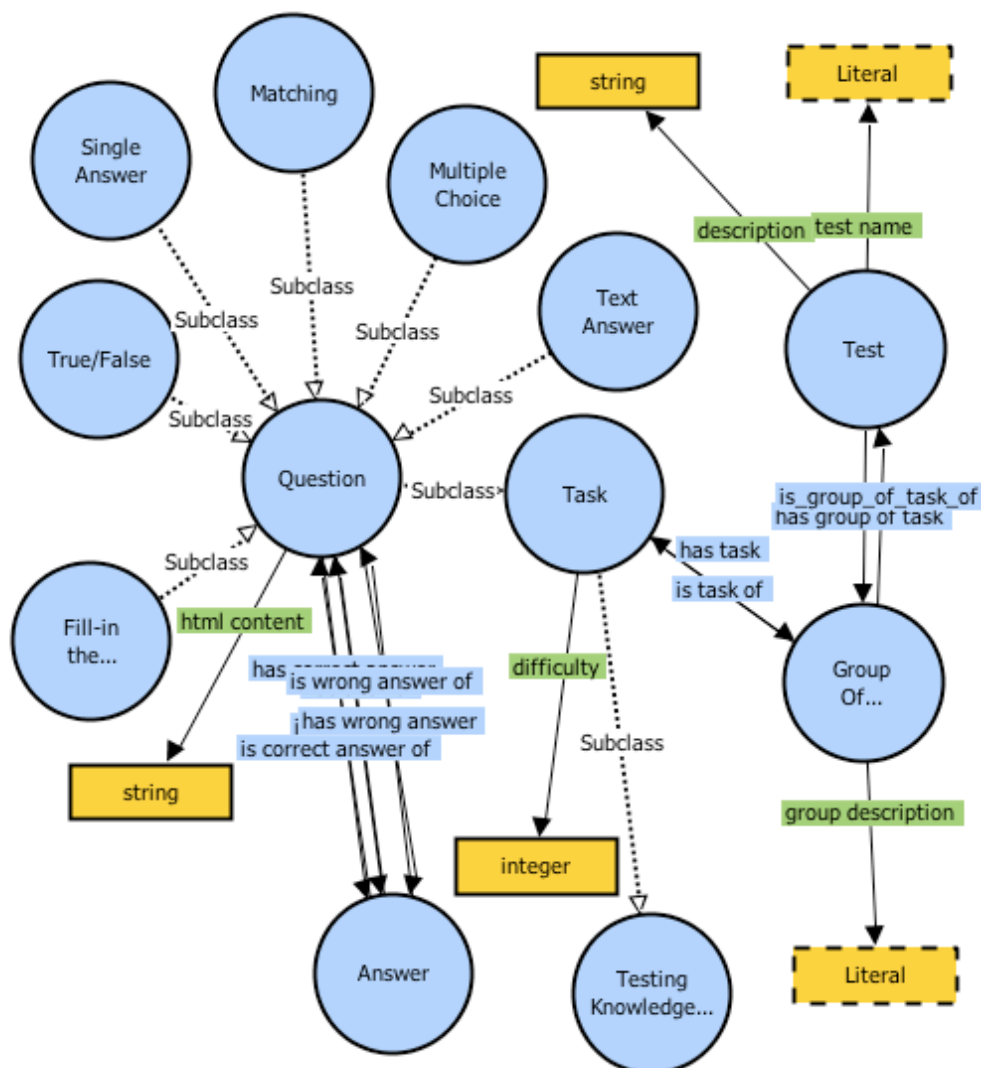


Рис. 1. Онтология электронных тестов

Система управления семантическими данными доступна по адресу: <http://ecole.ifmo.ru:8888/resource/HomePageNew?view=wiki>.

Для автоматического создания связей между объектами системы дистанционного обучения была разработана методика и реализован модуль по связыванию предметных терминов системы с электронными тестами. Данный модуль, используя алгоритмы обработки естественного языка, позволяет найти предметные термины в тексте определенного вопроса электронного теста. На основе полученных результатов поиска модуль производит семантическое связывание объекта предметного термина с объектом вопроса в тесте, что позволяет определить, какие термины использовались в конкретном вопросе. Модуль был опробован на тесте по физике, состоящем из 20 вопросов. По результатам его работы было найдено 155 терминов-«кандидатов», из которых 50 % были связаны с предметными терминами системы. Из всех вопросов теста 95 % были связаны с одним или более терминами системы. Разработанная методика не смогла покрыть те ситуации, в которых термин не упоминается явно в тексте вопроса, но должен быть связан с ним. Такими вопросами могут являться задачи по геометрии, где в тексте явно не упоминается теорема, которая позволит решить задачу.

Для взаимодействия системы с пользователем был разработан модуль пользовательского интерфейса, который предоставляет студентам дополнительные возможности по прохождению курсов, лекций, практик и тестов. Он производит управление и администрирование пользователей системы. Авторизация в системе возможна с помощью социальных сетей. Модуль получает данные из хранилища открытых связанных данных и преобразует их в формат удобный пользователю. Он позволяет отображать видеолекции, презентации, литературу, тесты и практики. В нем реализован основной функционал по работе с семантическими данными в виде поиска по терминам и структурированного отображения содержания курса с отметками о выполнении.

Модуль доступен по адресу: <http://ecole.ifmo.ru>.

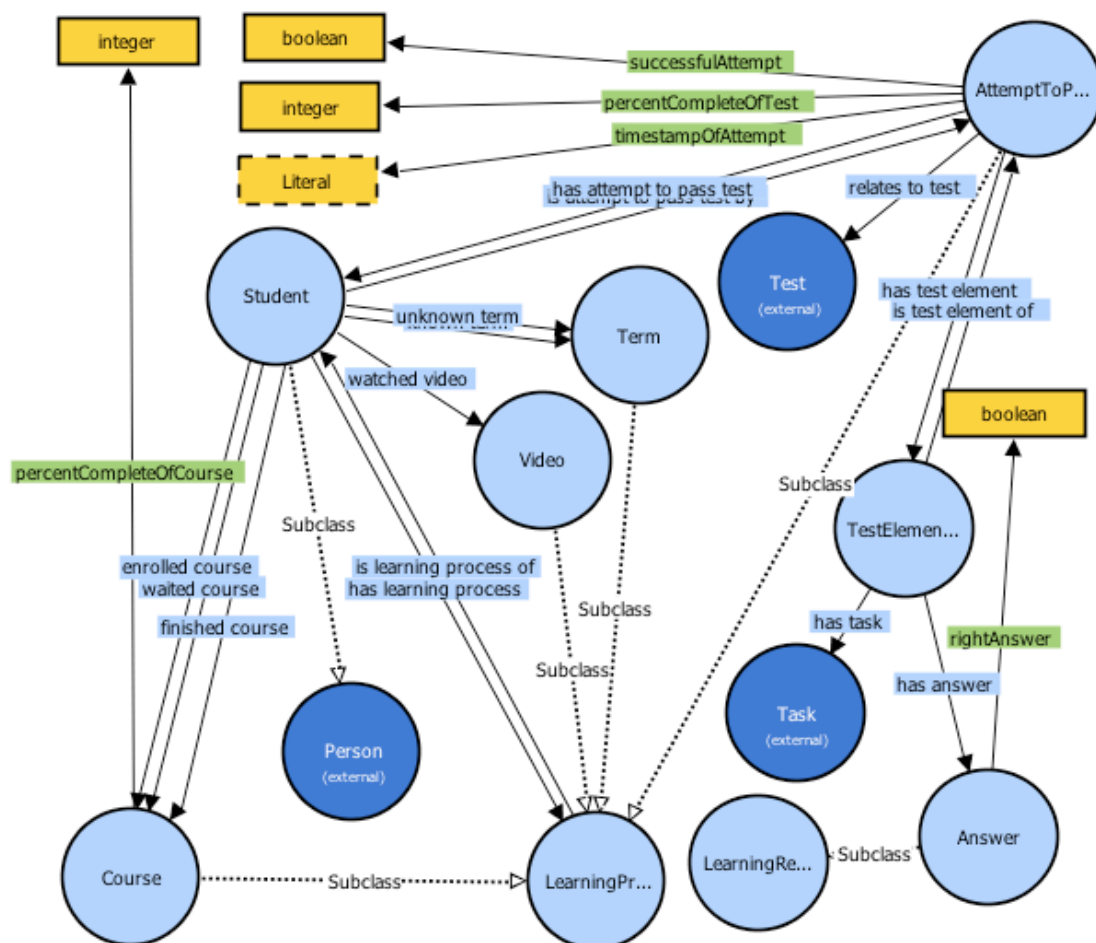
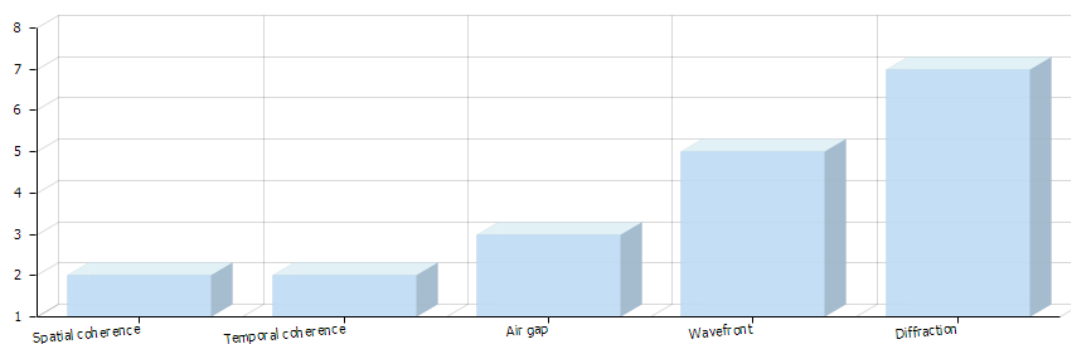


Рис. 2. Онтология действий пользователя в системе

Для сбора информации о деятельности пользователя в системе дистанционного обучения разработан модуль сбора статистики. Он записывает действия пользователя при прохождении тестов и лекций. Данная статистика записывается в формате онтологий и отсылается в основное хранилище. Разработанная онтология действий пользователя в системе представлена на рис. 2.

Для оценки деятельности пользователей в системе применяются накопленные статистические данные. Онтологический формат хранения статистики позволяет создавать различные запросы к базе знаний для формирования определенной аналитики. В данном проекте был проведен расчет и визуализация аналитики самых сложных предметных терминов системы. На показатель сложности предметного термина влияет количество правильных и неправильных ответов на вопросы, с которыми он связан. Также было учтено количество попыток ответов на вопросы. На основе полученных данных была проведена визуализация аналитики. График сложности предметных терминов по физике представлен на рис. 3.

Unclear Terms



Term	Correct Answers	All Answers	Rank
Spatial coherence	6	10	2
Temporal coherence	6	10	2
Air gap	4	5	3
Wavefront	7	9	5
Diffraction	9	11	7
Intensity	11	14	8
Wavelength	18	27	9
Fringes	20	29	11
Path	24	32	16
The interference pattern	30	42	18
Interference	39	54	24

Рис. 3. График сложности предметных терминов по физике

Заключение

На основе разработанной комплексной методики были созданы программные модули, успешно интегрированные в систему дистанционного обучения.

В результате исследования были проанализированы знания студентов по предметным терминам электронного учебного курса. Разработанная методика показала гибкость своего применения для построения различных аналитических отчетов на основании полученной статистики и установленных метрик.

Сбор дополнительной статистики по действиям пользователей в системе и определение метрик в формуле расчета сложности предметного термина позволит улучшить точность расчета рейтинга термина. Результаты исследования показывают, что самыми сложными терминами для студентов являются те, которые редко встречаются в вопросах. При расчете

рейтинга необходимо учитывать «важность» термина в предметной области, определяемой в свою очередь количеством терминов, изучение которых зависит от данного термина.

Разработанная методика позволит реализовывать вспомогательные аналитические модули для системы дистанционного образования. Использование открытых связанных данных поможет интегрировать системы дистанционного обучения в окружение различных образовательных учреждений. Открытые связанные данные дают возможность соединять различные системы дистанционного образования в единый кластер.

Публикации

Mouromtsev D., Kozlov F., Kovriguina L., Parkhimovich O. A Combined Method for E-Learning Ontology Population based on NLP and User Activity Analysis. SPb., 2014. – 15 p.

Литература

1. *Mouromtsev D., Kozlov F., Parkhimovich O., Zelenina M.* Development of an ontology-based e-learning system // Knowledge Engineering and the Semantic Web. 4th International Conference, KESW 2013. St. Petersburg, Russia, October 7–9, 2013. Proceedings. 2013. P. 273–280.
2. *Haase P., Schmidt M., Schwarte A.* The information workbench as a self-service platform for linked data applications // COLD Workshop. 2011. P. 18–20.
3. *Vas R.* Educational ontology and knowledge testing // The Electronic Journal of Knowledge Management. 2007. Vol. 5. No 1. P. 123–130.



Кривошеев Сергей Владимирович
Факультет точной механики и технологии
Кафедра мехатроники
E-mail: krivosheev.sergey89@gmail.com

РАЗРАБОТКА ПРОТЕЗА ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ КИСТИ С ВИБРОТАКТИЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

С.В. Кривошеев, И.И. Борисов
Научный руководитель – доцент С.С. Резников

Конечная цель проекта – создание современного конкурентоспособного (по доступной цене) протеза кисти человека (в дальнейшем планируется разработка и производство других типов протезов в зависимости от высоты ампутации). В конструкции протеза для осуществления процесса сгибания/разгибания пальцев с помощью шкива на валу двигателя и протянутой через весь палец тонкой металлической лески используются недорогие двигатели с редукторами. Помимо этого, в конструкцию протеза введена дополнительная степень свободы большого пальца (обеспечивается с помощью серводвигателя). Она повышает сложность и точность возможных движений. Наконец, сама конструкция изготовлена с активным применением технологии трехмерной печати, что улучшает целый ряд характеристик и в первую очередь снижает стоимость и усовершенствует индивидуализацию протезов за счет простоты изменения трехмерной модели в современных САПР-системах.

Двумя наиболее важными отличительными особенностями данного протеза являются наличие обратной связи и интуитивная система управления.

В этом году задачами проекта были:

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

- сборка модели протеза;
- разработка интуитивной системы управления;
- введение обратной связи.

В данном разделе рассматриваются основные подходы и алгоритм действий связанных с проектированием кисти [1, 2, 3]. Приведены некоторые расчеты по основным элементам конструкции [4]. В самом общем случае при динамическом анализе изучают влияние внешних сил, сил веса звеньев, трения и инерции на звенья механизма, их элементы, кинематические пары и неподвижные опоры, а также устанавливают способы уменьшения динамических нагрузок, возникающих при движении механизма. Общепринятый матричный принцип [5] описания динамики конструкции Деневица-Хартенберга, применяемый для манипуляторов, является примерным и не учитывает частных особенностей конструкции. Предлагаемый вариант динамического исследования позволяет провести приближенный к реальной конструкции анализ плоского механизма, работа которого основана на системе тросов. Задача заключается в выводе суммарного значения моментов, появляющихся в «суставах» при натяжении тросов, которое зависит от веса звеньев, их инерции, сил внешней нагрузки, а также моментов трения (так как конструкция лишена подшипников). Данный способ расчета позволяет определить оптимальные геометрические параметры механизма, получение которых невозможно осуществить матричным способом, использующим значения сил натяжения тросов.

Итак, необходимо определить зависимость между геометрическими размерами пальцев и усилиями, необходимыми на их сгибание, а также провести подбор двигателя и троса. Сгибание пальца осуществляется за счет моментов, которые появляются в его суставах при натяжении тросов. Сам же трос натягивается, наматываясь на катушку, расположенную на роторе электродвигателя.

Прототип пальца был изготовлен с помощью технологии трехмерной печати из ABS-пластика. За исходные данные примем габаритные размеры пальца, соответствующие размерам настоящего человеческого пальца, а также массы изготовленных моделей фаланг. Определим значение обобщенной силы натяжения троса, равной сумме обобщенных сил, действующих на каждую фалангу.

Составим систему уравнений моментов на дистальной (третьей), медиальной (второй) и проксимальной (первой) фалангах. На них действуют силы тяжести фаланг, силы натяжения троса и внешняя нагрузка, подводимая к кончику пальца.

Прототип пальца был изготовлен с помощью технологии трехмерной печати из ABS-пластика. За исходные данные примем габаритные размеры пальца, соответствующие размерам настоящего человеческого пальца, а также массы изготовленных моделей фаланг. Определим значение обобщенной силы натяжения троса, равной сумме обобщенных сил, действующих на каждую фалангу [6].

Составим систему уравнений моментов на дистальной (третьей), медиальной (второй) и проксимальной (первой) фалангах. На них действуют силы тяжести фаланг, силы натяжения троса и внешняя нагрузка, подводимая к кончику пальца.

где M_i – момент на каждой из фаланг; l_i – длина каждой фаланги; G_i – сила тяжести i -ой фаланги; F_i – составляющая обобщенной силы, действующая только на i -ю фалангу; M_m – момент трения в суставах; P – внешняя нагрузка.

Зная угол поворота и необходимый интервал времени на сгибание всего пальца можно рассчитать вращательную скорость фаланг и соответственно их вращательное ускорение. Так как углы и время поворота одинаковы для всех трех фаланг, то и значения ускорений будут одинаковы. В результате, имеем:

где J_{xi} – момент инерции i -ой фаланги относительно оси OX ; ε_i – ее ускорение; ω_i – ее угловая скорость и t_p – время разгона фаланги.

С помощью электромиографа регистратора (ЭМГ-регистратора) были получены сигналы биоэлектрической активности, которые в дальнейшем используются как управляющие сигналы. Данный способ требует наличия только самого устройства, а электроды могут быть расположены практически на любой части руки. В нашем распоряжении был двухканальный электронейромиограф отечественного производства. В целом было выделено три основных схвата: щипковый, цилиндрический и сферический. Были получены некоторые экспериментальные данные, которые характеризуют движение кисти с точки зрения электронейромиографии. Однако полученные данные необходимо еще лучше проанализировать для дальнейшего применения в разрабатываемой системе управления. Поэтому было решено несколько изменить направление исследования и разработать простую в использовании и легкую для запоминания систему управления. Простейший язык условных команд – это единичное мышечное сокращение длительностью менее 1,5 с, два единичных мышечных сокращения с интервалом менее 2 с (двойное), единичное длительное мышечное сокращение продолжительностью более 1,5 с. То есть параметрами, которые характеризуют сигнал, считаем его длительность и интервал между соседними сигналами. Причем предложенная система позволяет с высокой точностью определять необходимые параметры, что следует из природы получаемых данных. Электроды для снятия показаний были размещены на кожном покрове примерно на *m. Brachioradialis*, сигнал возбуждения проходит по *Cvi_Vij. N. Medianus*. Частота снятия показаний составляла порядка 10 тыс. измерений в секунду. Данные были представлены в виде файлов в формате .xml. Для работы в среде MatLab понадобилось конвертировать .xml файлы в .txt и только затем уже обрабатывать их.

Следующим этапом после фильтрации данных было составление алгоритма обработки данных, который бы выделял необходимые три типа сигнала по характерным параметрам. Весь массив данных последовательно просматривался и оценивался программой. Если значение сигнала превышало пороговое (в нашем случае 1 мВ), значит, произошло возмущение и пользователь что-то сообщает системе. Кроме этого, определялось еще и время окончания возмущения, так как одним из параметров, которые оценивались, является длительность сигнала. Следующим этапом было выделение одного из трех типов сигнала. Единичное возмущение отбиралось следующим образом: определялось время начала возмущения и его длительность. Затем из единичных возмущений отбирались двойные, если таковые имелись. Как было сказано выше, это выполнялось с помощью параметра интервала между возмущениями, который составлял менее 2 с. Последними отбирались длительные возмущения, характеризовавшиеся продолжительностью более 1,5 с. Результат работы алгоритма приведен на рис. 1.

Важным результатом проведенных исследований, кроме составления алгоритма, было подтверждение гипотезы о схожести характерного вида графиков при мышечных сокращениях у разных людей. Для этого были проведены дополнительные эксперименты по получению данных с ЭМГ-регистратора у еще одного человека. В дальнейшем планируется увеличить группу испытуемых, для того чтобы можно было говорить об универсальности разработанного алгоритма поиска.

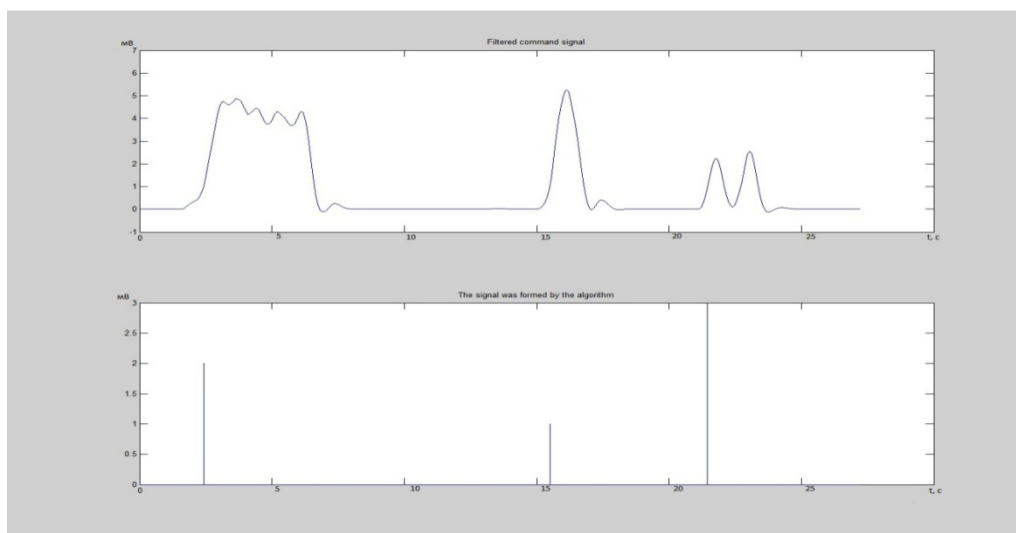


Рис. 1. Результаты работы алгоритма поиска и определения типа мышечных сокращений

Исследования, проводящиеся на Западе по комфортности использования современных протезов, подчеркивают исключительную важность и актуальность наличия в них обратной связи [7, 8, 9].

Проект ориентирован на неинвазивные методы получения и передачи информации, что является одним из ключевых факторов, по которым будет производиться оценка применимости того или иного метода обратной связи в этом проекте.

Итак, на данный момент проводятся различные исследования по внедрению тех или иных технологий для улучшения взаимодействия человека с виртуальной и реальной средами через машинное восприятие (исследование поверхности других планет, удаленных и труднодоступных уголков нашей планеты). Все это дало повод для развития такой интересной научно-технической области как *haptic technology*. В нашей стране данное направление не достаточно широко распространено, однако имеет хороший потенциал для применения, в том числе в протезировании. Рассматриваемый нами подход реализации обратной связи между протезом и человеком позаимствован именно из этой области. Суть его сводится к тому, что на культе пациента размещается группа миниатюрных вибромоторов, которые могут срабатывать в различных режимах сигнализируя человеку о тех или иных событиях. Например, если выбирается режим обратной связи по силе схвата, то вибромоторы в зависимости от силы сжатия объекта включаются в определенной последовательности, если выбран режим «ощущения», то в зависимости от того, какой из пальцев коснулся объекта манипуляции, пациент будет ощущать действие одного из пяти вибромоторов.

Явными достоинствами данной технологии являются:

- неинвазивность;
- низкая стоимость;
- простота в эксплуатации;
- высокий процент вероятности успеха.

К минусам можно отнести неестественный способ передачи информации и ограниченность его возможностей (необходимо вводить дополнительные элементы для передачи данных о других ощущениях, таких как температура).

Вторым, рассмотренным нами методом, является *targeted muscle reinnervation (TMR)*. Суть его сводится к тому, что к живым нервным окончаниям путем хирургического вмешательства присоединяются электроды, которые могут работать в обоих направлениях как на восприятие информации от нервного окончания и генерацию сигнала управления для протеза, так и в обратном. То есть при прикосновении к объекту генерируется электрический сигнал, который преобразовывается в нервный импульс, передающийся в нервную систему.

Люди, на которых был опробован данный метод, испытали «восхитительные эмоции, ощутив руку».

У метода есть ряд недостатков:

- инвазивность;
- высокая стоимость и сложность;
- сложность в обслуживании;
- вероятность паралича задействованных нервных окончаний;
- неудачный исход операции по реиннервации;

Из явных плюсов можно выделить следующие:

- естественный способ получения информации;
- широкий спектр применения (сигнал управления и обратная связь, возможность передачи информации о разных ощущениях);
- высокая эффективность.

Заключение

Подводя итоги проделанной работы, можно говорить о следующих результатах:

– разработана и собрана недорогая действующая модель протеза кисти человека с применением технологии трехмерной печати. Проведены расчеты по подбору двигателей, разработана компоновка и собран первый вариант протеза;

– выделены и проанализированы основные схваты, применяемые людьми каждый день. Для получения сигналов управления разработана простая система управления с применением технологии электромиографии. Получены данные для дальнейшей расшифровки электромиограмм при с хватах различных типов;

– проведен анализ двух возможных видов обратной связи и выделен один, наиболее подходящий, – с применением вибромоторов. Подобраны необходимые для его реализации элементы, в том числе вибромоторы, гибкие резистивные датчики, контроллер.

Все достигнутые результаты имеют широкий спектр применения: в робототехнике (конструкция рук антропоморфных роботов, удаленное управление и обратная связь), реабилитационной технике и космической области.

Публикации

1. *Кривошеев С.В., Орманов Д.Р.* Оптимизация движения с помощью решения обратной задачи кинематики для твердотельной модели многозвенного манипулятора в среде Matlab методом перебора // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 20–22.
2. *Борисов И.И., Кривошеев С.В., Резников С.С.* Конструирование и математический анализ антропоморфного протеза кисти // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 351–352.
3. *Кривошеев С.В., Орманов Д.Р.* Управление моделью многозвенного манипулятора с помощью сигналов электрических токов, снятых с поверхности руки // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 2. С. 41–44.

Литература

1. *Carrozza M.C., Cappiello G., Micera S., Edin B.B., Beccai L., Cipriani C.* Design of a cybernetic hand for perception and action // Biological Cybernetics. 2006. Vol. 95. No 6. P. 629–644.
2. *Carrozza M.C., Massa B., Micera S., Lazzarini R., Zecca M., Dario P.* The development of a novel prosthetic hand-ongoing research and preliminary results // IEEE/ASME Transaction on Mechatronics. 2002. Vol. 7. No 2. P. 108–114.
3. *Smit G., Plettenburg D.H., van der Helm F.C.T.* Design and evaluation of two different finger concepts for body-powered prosthetic hand // Journal of Rehabilitation Research and Development. 2014. Vol. 50. No 9. P. 1253–1266.
4. *Артоболовский И.И.* Теория машин и механизмов: Учеб. для вузов. М., 1988. – 640 с.
5. *Иванов М.Н.* Детали машин. М., 2003. – 408 с.

6. Брицкий В.Д., Тимофеев Б.П. Кинематический и динамический анализ манипуляционной системы робота. Учебное пособие. СПб., 2004. – 19 с.
7. Witteveen H.J.B., de Rond L., Rietman J.S., Veltink P.H. Hand-opening feedback for myoelectric forearm prostheses: Performance in virtual grasping tasks influenced by different levels of distraction // Journal of Rehabilitation Research and Development. 2012. Vol. 49. No 10. P. 1517–1526.
8. Keller A.D., Taylor C.L., Zahn V. Studies to determine the functional requirements for hand and arm prostheses. Los Angeles, 1947. – 66 p.
9. Belter J.T., Dollar A.M. Performance characteristics of anthropomorphic prosthetic hands // Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. 2011. P. 921–927.



Кривых Александр Владимирович
Факультет точной механики и технологий
Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии
E-mail: krivykh1987@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПЕКТРОВ

А.В. Кривых

Научный руководитель – профессор В.С. Сизиков

Цель проекта – развитие устойчивых математических методов и алгоритмов восстановления заглаженных и зашумленных, непрерывных и дискретных спектров по измеренному спектру и аппаратной функции (АФ) спектрометра в технических системах спектрального анализа.

Измеренный спектрометром спектр $u(\lambda)$, как известно, отличается от истинного спектра $z(\lambda)$, во-первых, большей сглаженностью (не разрешены близкие линии, заглажена тонкая структура спектральной линии и т. д.), что является результатом воздействия АФ спектрального прибора, во-вторых, зашумленностью (слабые линии «тонут» в шуме), что является результатом погрешностей измерений, а также воздействия среды, через которую проходит излучение.

В случае непрерывных спектров обратная задача спектрометрии (восстановление истинного спектра) описывается интегральным уравнением (ИУ) Фредгольма I рода:

$$Az \equiv \int_a^b K(\lambda, \lambda') z(\lambda') d\lambda' = u(\lambda), \quad c \leq \lambda \leq d, \quad (1)$$

где $[a, b]$ – пределы искомого спектра $z(\lambda')$, а $[c, d]$ – пределы измеренного спектра $u(\lambda)$.

Для решения данной обратной задачи использовался метод регуляризации Тихонова, согласно которому решается операторное уравнение, а при использовании метода квадратур – система линейных алгебраических уравнений: $(\alpha E + A^T A) z_\alpha = A^T u$, где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, E – единичный, а A^T – транспонированный оператор (матрица).

При решении данной задачи открытым является вопрос о выборе параметра регуляризации α и об оценке погрешности регуляризованного решения z_α . От значения α зависит качество восстановления спектра. Для выбора параметра α был разработан новый адаптивный способ модельных (обучающих) спектров, который состоит в следующем.

Обозначив за $\Delta z_\alpha = z_\alpha - z$ – погрешность регуляризованного решения z_α , а z – точное решение, была получена следующая оценка относительной погрешности решения z_α :

$$\sigma_{\text{отн}}(\alpha) \equiv \frac{\|\Delta z_\alpha\|}{\|z\|} \leq \varepsilon(\alpha), \quad (2)$$

где

$$\varepsilon(\alpha) = \|(\alpha E + \tilde{B})^{-1} \tilde{A}^T\| \cdot \|\tilde{A}\| \eta + \alpha \|(\alpha E + \tilde{B})^{-1}\|. \quad (3)$$

Здесь $\tilde{B} = \tilde{A}^T \tilde{A}$, $\eta = \delta_{\text{отн}} + \xi_{\text{отн}}$, $\delta_{\text{отн}} = \delta / \|u\|$, $\xi_{\text{отн}} = \xi / \|A\|$ – относительные погрешности исходных данных. Функция $\varepsilon(\alpha)$ является верхней огибающей для истинной относительной погрешности $\sigma_{\text{отн}}(\alpha)$. В выражении (4): $\|(\alpha E + \tilde{B})^{-1} \tilde{A}^T\| \leq 1/(2\sqrt{\alpha})$. Норму $\|(\alpha E + \tilde{B})^{-1}\|$ выразим через минимальное сингулярное число μ симметричного положительно определенного оператора $\alpha E + \tilde{B}$:

$$\|(\alpha E + \tilde{B})^{-1}\| = 1/\mu_{\min}(\alpha E + \tilde{B}) = 1/(\alpha + \mu_{\min}(\tilde{B})).$$

Получим: $\varepsilon(\alpha) \leq \frac{\|\tilde{A}\|}{2\sqrt{\alpha}} \eta + \frac{\alpha}{\alpha + \mu_{\min}(\tilde{B})}$. Однако такая оценка на практике может давать

значительное завышение по сравнению с $\sigma_{\text{отн}}(\alpha)$, поскольку в случае плохо обусловленных и некорректных задач $\mu_{\min}(\tilde{B})$ близко или равно 0. Чтобы приблизить $\varepsilon(\alpha)$ к $\sigma_{\text{отн}}(\alpha)$, сделано усечение снизу множества сингулярных чисел оператора (матрицы) \tilde{B} , а именно, вместо $\mu_{\min}(\tilde{B})$ использовано некоторое значение $g > \mu_{\min}(\tilde{B})$:

$$\varepsilon(\alpha) = \frac{\|\tilde{A}\|}{2\sqrt{\alpha}} \eta + \frac{\alpha}{\alpha + g}. \quad (4)$$

Оценка g (4) может быть получена графически – путем подбора такого его значения, при котором огибающая $\varepsilon(\alpha)$ касается кривой (или набора кривых) $\sigma_{\text{отн}}(\alpha)_Q$.

Согласно соотношениям (2) и (4) оценка относительной погрешности регуляризованного решения z_α зависит от \tilde{A} и η . Поэтому, если решается несколько примеров (спектров) с одинаковыми \tilde{A} и η , то для них оценки погрешности (2) и (4) будут одинаковыми (в функции α). Отсюда следует, что при решении исходного примера P (то есть при обработке исходного спектра \tilde{y}_P) с неизвестным решением-спектром z_P можно использовать результаты решения другого, модельного (обучающего) примера Q с известным (заданным) точным решением-спектром z_Q , с такими же \tilde{A} и η , что и в примере P . При этом при решении примера Q можно рассчитать функцию $\sigma_{\text{отн}}(\alpha)_Q = \|\Delta z_{\alpha Q}\|/\|z_Q\|$ и по ней найти $\alpha_{\text{опт}Q}$ – оптимальное значение α , при котором $\sigma_{\text{отн}}(\alpha)_Q = \min_{\alpha}$. Данное значение

$\alpha_{\text{опт}Q}$ можно использовать при решении примера-спектра P .

Для повышения эффективности изложенного способа при составлении модельного спектра Q нужно использовать дополнительную информацию об исходном спектре P : оценку количества спектральных линий (пиков) в искомом спектре z_P , соотношений их интенсивностей, значений их длин волн, тип АФ и т. д. Использование такой информации позволит более удачно выбрать параметр регуляризации α и оценить погрешность восстановления Q и P .

В случае дискретных спектров обратная задача спектрометрии описывается системой линейно-нелинейных уравнений (СЛНУ), в которую амплитуды линий входят линейно, а их частоты (или длины волн) – нелинейно:

$$\sum_{j=1}^n K(v_i, v'_j) z_j + F = \tilde{u}(v_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad c \leq v_i \leq d,$$

где v_i – дискретный отсчет v , m – число таких отсчетов, $\tilde{u}(v_i) = u(v_i) + \delta u(v_i)$, δu – случайная компонента шума измерений, F – детерминированная компонента шума (фон).

Для решения СЛНУ предложен адаптивный алгоритм интегральной аппроксимации.

1. Решается ИУ Фредгольма I рода (1) методом регуляризации Тихонова с заниженным значением параметра регуляризации α (это необходимо для разрешения близких линий). В результате получим решение $z_\alpha(v')$, в котором могут разрешиться близкие линии, а из-за пониженности α – возникнуть ложные пики-линии.

2. В полученном решении $z_\alpha(v')$ выделяется (на основе дополнительной информации) $L \geq n$ наиболее мощных максимумов, где n – предполагаемое число линий. Фиксируются частоты наиболее мощных максимумов $\tilde{v}'_j, j = \overline{1, L}$.

3. Решается уточняющая СЛАУ $\sum_{j=1}^L K(v_i, \tilde{v}'_j) \tilde{z}_j + \tilde{F} = \tilde{u}(v_i), i = \overline{1, m}, c \leq v_i \leq d$, методом наименьших квадратов Гаусса относительно L интенсивностей линий \tilde{z}_j и фона \tilde{F} .

4. Оставляются те линии, значения интенсивностей \tilde{z}_j которых преодолели заданный барьер Z (обычно ложные максимумы принимают отрицательные значения или близкие к 0).

Достоинство алгоритма интегральной аппроксимации (наиболее сложная часть задачи) – определение нелинейно входящих значений частот (а также их числа – n) – решается линейно.

Для исследования разработанных методов и алгоритмов восстановления непрерывных спектров была выполнена обработка спектра-оригинала P (рис. 1), у которого был известен зашумленный спектр $\tilde{u}(\lambda)$, измеренный шестью спектральными приборами с типичными АФ.

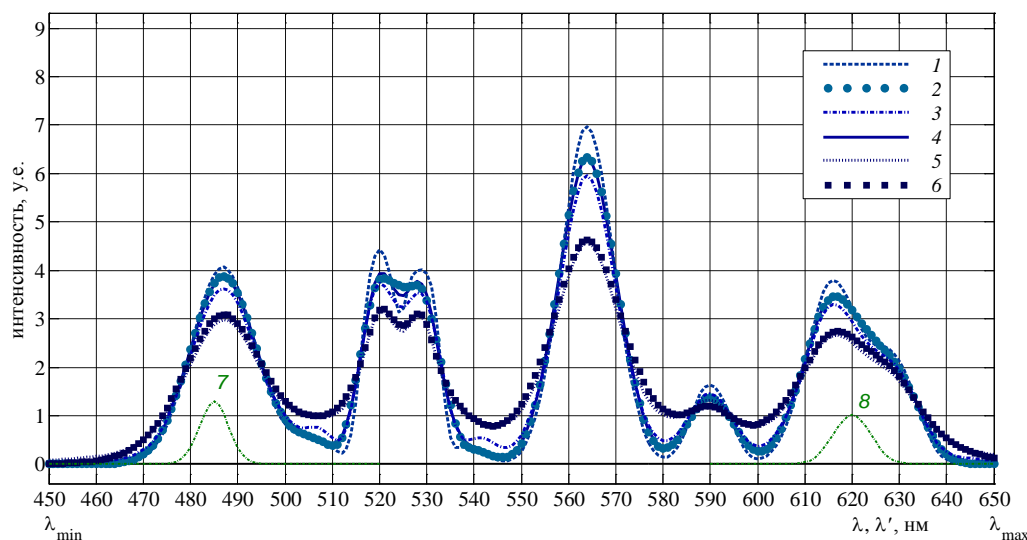


Рис. 1. Спектр P . Измеренные спектры $u(\lambda)$, полученные с использованием аппаратных функций: 1 – прямоугольной; 2 – треугольной; 3 – дифракционной; 4 – гауссовой; 5 – дисперсионной и 6 – экспоненциальной, а также 7 и 8 – два сечения гауссовой АФ

В качестве модельного (обучающего) примера Q был смоделирован близкий к оригиналу P пример, истинный спектр которого $z_Q(\lambda)$ состоял из девяти спектральных линий в виде гауссиан.

На рис. 2 в качестве примера приведен спектр $u_Q(\lambda)$ для гауссовой АФ.

Для выбора параметра регуляризации α модельный пример Q был решен методом квадратур с регуляризацией Тихонова при разных АФ для ряда значений α . По минимуму огибающей $\varepsilon(\alpha)$ выбрано значение параметра регуляризации. Решение (восстановленный спектр) $z_{\alpha Q}(\lambda)$ при $\alpha = \alpha_g = 10^{-2,3}$ для гауссовой АФ представлен на рис. 2 – восстановились практически все линии.

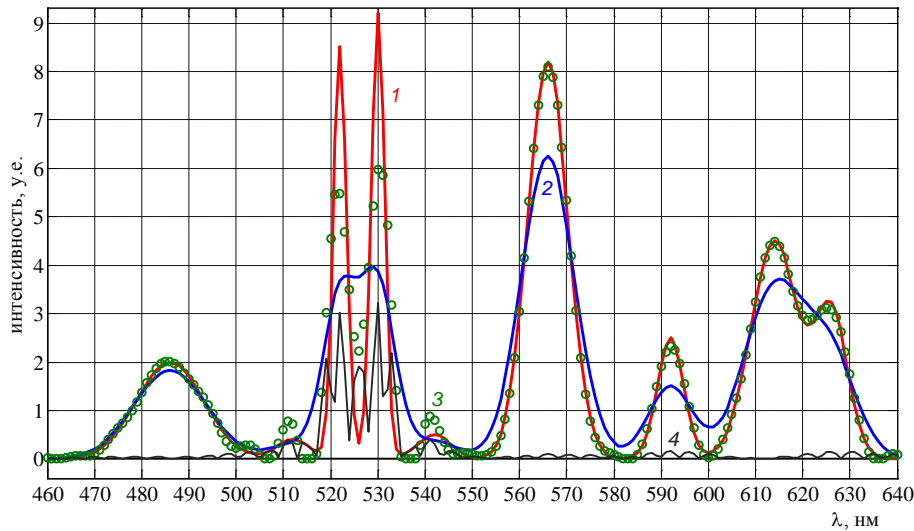


Рис. 2. Спектр Q . Гауссова АФ. Прямая и обратная задача: 1 – истинный спектр $z_Q(\lambda)$; 2 – измеренный $u_Q(\lambda)$; 3 – восстановленный $z_{\alpha Q}(\lambda)$ при $\alpha = \alpha_g = 10^{-2,3}$, $\sigma_{\text{отн}}(\alpha_g) = 0,215$; 4 – абсолютная погрешность в каждой точке спектра $|z_Q(\lambda) - z_{\alpha Q}(\lambda)|$

В Таблице приведены значения α_g для АФ различных типов в примере Q . С такими значениями α_g был решен исходный пример P , а также значения $\sigma_{\text{отн}}(\alpha_g)$ для примера P (равные $\varepsilon(\alpha_g)$ согласно (4)). Следует подчеркнуть, что значение относительной погрешности восстановления спектра $\sigma_{\text{отн}}(\alpha_g)$ вычисляется через посредство $\varepsilon(\alpha_g)$ без использования точного спектра $z_P(\lambda)$ и дает близкую (или даже равную) оценку сверху для истинной погрешности.

Таблица

Результаты восстановления спектра P

АФ	α_g	$\sigma_{\text{отн}}(\alpha_g)$	$\alpha_{\text{опт}}$	$\sigma_{\text{отн}}(\alpha_{\text{опт}})$	$\frac{\sigma_{\text{отн}}(\alpha_g)}{\sigma_{\text{отн}}(\alpha_{\text{опт}})}$	$\sigma_{\text{отн}}$	$\frac{\sigma_{\text{отн}}}{\sigma_{\text{отн}}(\alpha_g)}$	$\frac{\sigma_{\text{отн}}}{\sigma_{\text{отн}}(\alpha_{\text{опт}})}$
Прямоугольная	$10^{-1,8}$	0,192	$10^{-1,6}$	0,191	1,01	0,290	1,51	1,52
Треугольная	$10^{-2,5}$	0,197	$10^{-3,4}$	0,163	1,21	0,348	1,77	2,13
Дифракционная	$10^{-2,6}$	0,132	$10^{-3,5}$	0,115	1,15	0,326	2,47	2,83
Гауссова	$10^{-2,5}$	0,119	$10^{-3,4}$	0,098	1,21	0,324	2,72	3,31
Дисперсионная	$10^{-2,2}$	0,073	$10^{-3,0}$	0,054	1,35	0,369	5,05	6,83
Экспоненциальная	$10^{-2,3}$	0,088	$10^{-2,9}$	0,068	1,29	0,378	4,30	5,56

Наименьшая погрешность восстановления $\sigma_{\text{отн}}(\alpha)$ получилась для дисперсионной и экспоненциальной АФ. Данный эффект объясняется тем, что резкий спад к нулю АФ (прямоугольной, треугольной) ведет к понижению устойчивости решения, эффекту Гиббса и т. д., а плавный спад к нулю АФ (дисперсионной, экспоненциальной) способствует устойчивости решения.

На рис. 4 представлен наилучший результат восстановления спектра $z_P(\lambda)$ – видно, насколько точно он восстановился: разрешились близкие и выделились слабые линии.

Также была выполнена обработка реального спектра двадцатипроцентной концентрации СО при $T = 700^\circ\text{C}$ $\tilde{y}(\lambda)$ (рис. 5), измеренного в лаборатории Risø DTU. На основе информации из HITRAN/HITEMP был составлен «синтетический» спектр $z_Q(\lambda)$ в обучающем примере Q , близком к реальному спектру P (рис. 6). На рис. 6 также представлен «экспериментальный» спектр $u_Q(\lambda)$. Далее синтетический пример Q был решен методом квадратур с регуляризацией Тихонова для ряда значений α и было рассчитано $\sigma_{\text{отн}}(\alpha)$. Значение параметра регуляризации выбрано равным $\alpha = \alpha_g = 10^{-2,3}$. С этим значением α был восстановлен спектр в примере P (рис. 5).

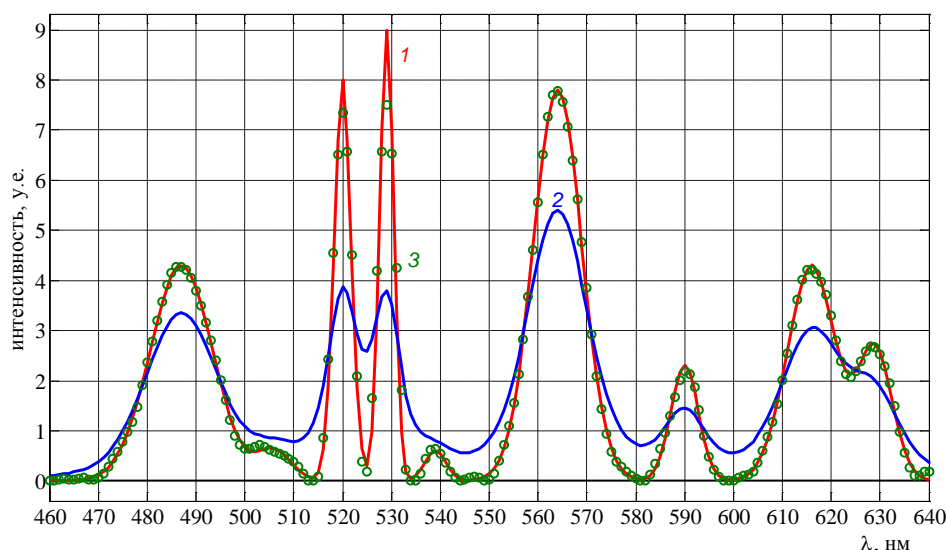


Рис. 4. Спектр Р. Дисперсионная АФ. Обратная задача: 1 – истинный спектр $z_P(\lambda)$; 2 – измеренный $u_P(\lambda)$ и 3 – восстановленный $z_{\alpha P}(\lambda)$ при $\alpha = \alpha_g = 10^{-2,2}$, $\sigma_{отн}(\alpha_g) = 0,073$

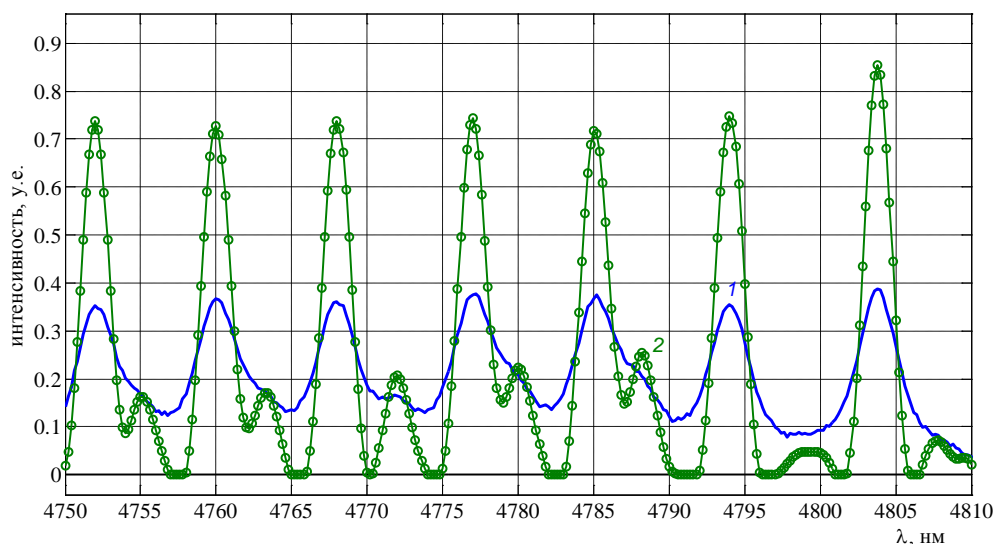


Рис. 5. Спектр двадцатипроцентной концентрации СО при температуре 700 °С (Risφ DTU): 1 – измеренный спектр $u_P(\lambda)$ и 2 – восстановленный $z_{\alpha P}(\lambda)$ при $\alpha = \alpha_g = 10^{-1,7}$, $\sigma_{отн}(\alpha_g) = 0,136$

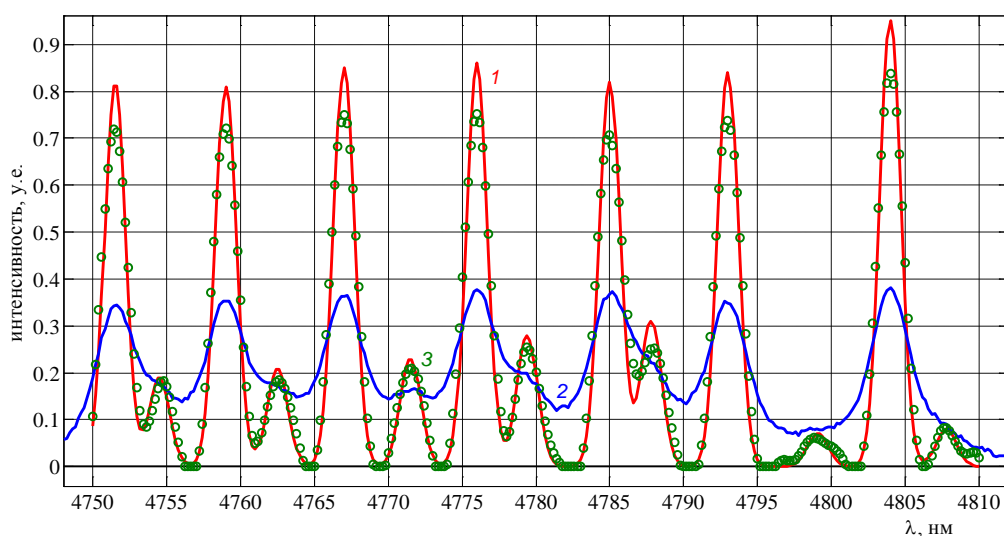


Рис. 6. Спектр Q. Прямая и обратная задачи: 1 – истинный спектр $z_Q(\lambda)$; 2 – измеренный $u_Q(\lambda)$ и 3 – восстановленный $z_{\alpha Q}(\lambda)$ при $\alpha = \alpha_g = 10^{-1,7}$, $\sigma_{отн}(\alpha_g) = 0,136$

Выполнена обработка модельного дискретного спектра, представленного на рис. 7. Точный (истинный) спектр $z(\nu)$ представлял собой семь дискретных спектральных линий, однако в экспериментальном спектре $u(\nu)$ видны только четыре линии. Восстановленный с помощью алгоритма интегральной аппроксимации спектр $z_j(\nu)$ приведен на рис. 8. Из рисунка видно, что все семь спектральных линий разрешились и с приемлемой точностью определились их частоты и интенсивности, причем ни одна линия не потерялась и ни одна ложная линия не появилась.

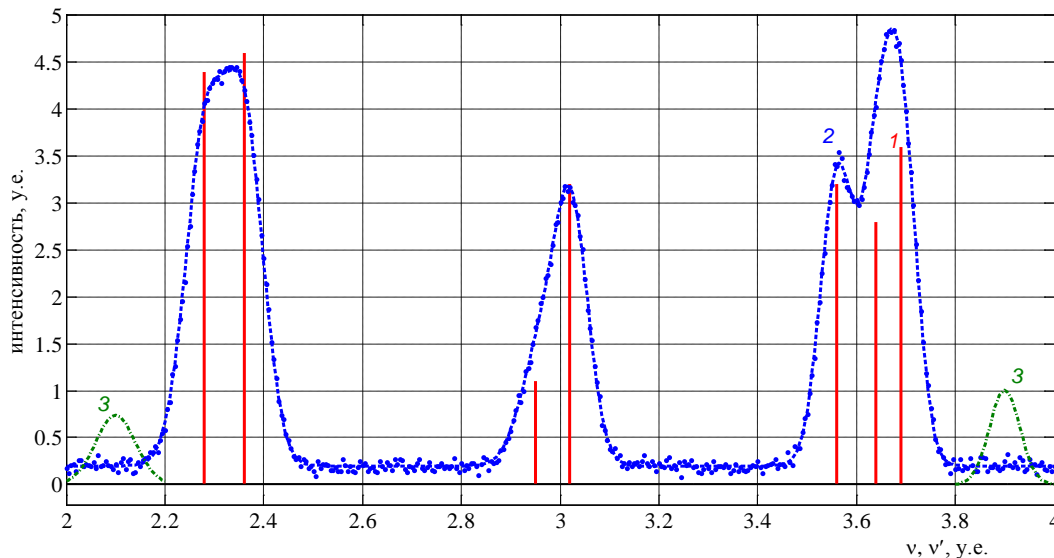


Рис. 7. Дискретный спектр. Прямая задача: 1 – истинный дискретный спектр $z(\nu)$; 2 – измеренный спектр без шума $u(\nu)$ и с шумом $\hat{u}(\nu)$ (2); 3 – АФ

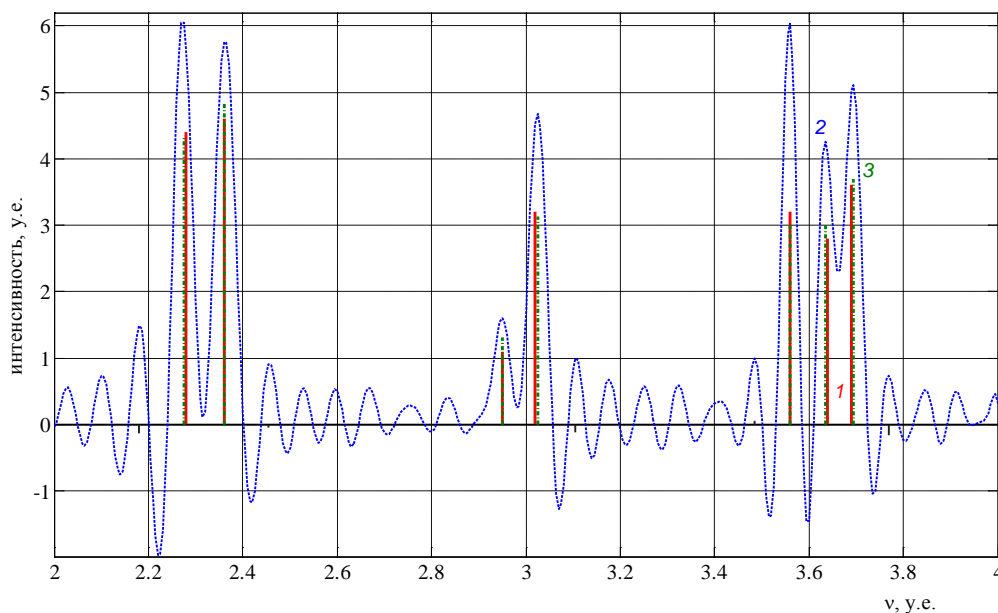


Рис. 8. Дискретный спектр. Обратная задача: 1 – точные интенсивности линий z_j (вертикальные сплошные); 2 – регуляризованное решение $z_\alpha(\nu')$ при $\alpha = 10^{-6}$ (пунктир); 3 – восстановленный спектр $z_j(\nu)$ (вертикальные штрихпунктирные линии)

Заключение

Поставленные в проекте задачи были успешно выполнены, а цель достигнута. За счет использования разработанных методов и алгоритмов восстановления спектров удалось повысить разрешающую способность спектральных приборов примерно в 3–5 раз, что позволило разрешить близкие линии и выделить слабые, определить сверхтонкую структуру линий.

Предложенные устойчивые методы и алгоритмы решения обратной задачи спектроскопии являются универсальными и могут быть применены для восстановления оптических, акустических, вибрационных и других спектров в различных областях: физике (изучение спектров газов, жидкостей, металлов и плазмы), астрофизике (изучение спектров звезд и планет), металлургии (определение состояния расплавленного металла), химии (определение химического состава вещества), геофизике (разведка руд, нефти и газа), механике (диагностика дефектов оборудования по вибрационным спектрам) и т. д.

Публикации

1. *Krivykh A.V., Sizikov V.S.* Reconstruction of continuous spectra by the regularization method using model spectra // *Optics and Spectroscopy*. 2014. Vol. 117. No. 6. P. 1010–1017.
2. *Кривых А.В., Сизиков В.С.* Восстановление непрерывных спектров методом регуляризации с использованием модельных спектров // *Оптика и спектроскопия*. 2014. Т. 117. № 5. С. 149–157.
3. *Кривых А.В., Сизиков В.С.* Восстановление непрерывных спектров адаптивным способом вычислительных экспериментов с регуляризацией // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 3 (85). С. 22–28.
4. *Кривых А.В., Сизиков В.С.* Применение способа эталонных примеров при решении обратной задачи спектроскопии методом регуляризации // *Известия вузов. Приборостроение*. 2011. Т. 54. № 9. С. 44–51.
5. *Кривых А.В., Сизиков В.С.* Обработка дискретных спектров с помощью алгоритма интегральной аппроксимации // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2011. № 5 (75). С. 14–18.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619530 «Программный комплекс для решения обратной задачи спектроскопии методом регуляризации с использованием модельных спектров», опубл. 18.09.2014.



Кузнецова Ольга Валерьевна
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: ovkpbks@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ

О.В. Кузнецова

Научный руководитель – доцент Е.Б. Романова

Основной целью проекта является разработка методов и алгоритмов повышения эффективности моделирования печатных узлов в системах автоматизированного проектирования (САПР) печатных плат в трехмерном пространстве. Разработка метода и алгоритма повышения эффективности моделирования печатных узлов (ПУ) основана на применении теории: систем автоматизированного проектирования, трехмерного моделирования, графов, алгоритмов размещения и методологии функционального моделирования и графической нотации IDEF0.

Разработка алгоритма ведется с целью улучшения качества размещения компонентов, условий для последующей трассировки проводников и уменьшения размеров плат. Разработка метода проектирования ПУ в 3D-пространстве ведется с целью улучшения качества разрабатываемого ПУ, уменьшения времени проектирования и числа итераций для дальнейшего проектирования устройства, а также для улучшения его эргономических показателей.

Сущность алгоритма состоит в последовательном закреплении заданного набора электронных компонентов (ЭК) в монтажном пространстве платы относительно ранее установленных. В качестве первоначально закрепленных на плате ЭК выбираются разъемы, которые располагают по краям платы или максимально нагруженные ЭК, расположение которых жестко закреплено в техническом задании. На каждом шаге для установки на плату необходимо выбирать ЭК из числа еще неразмещенных, имеющих максимальную степень связности с ранее закрепленными. Алгоритм можно использовать для размещения как одногабаритных, так и разногабаритных элементов, если их геометрические размеры кратны или близки к кратным.

В основе алгоритма лежит контроль высот: выполняется проверка установки корпусов ЭК в модуль верхнего уровня (например, установка печатной платы в корпус блока). Задача размещения сводится к тому, чтобы на множестве установочных вакантных позиций разместить множество элементов схемы таким образом, чтобы обеспечить экстремум целевой функции F .

$$F = \sum_{i=1}^k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k (L(t_i) + H(t_i))$$

где t_i – вариант размещения из множества T ; k – общее количество ЭК; $L(t_i)$ – оценка суммарной длины соединений; $H(t_i)$ – оценка минимизация высот зон платы.

Для учета минимизации суммарной длины соединений используется функция:

$$L(t_i) = \min \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k r_{i,j} * d_{i,j}$$

Монтажное пространство платы условно делится на зоны, число которых зависит от формы корпуса модуля верхнего уровня. ЭК в нем следует располагать, стремясь к минимизации высот (если компонент возможно расположить в зону с минимальной высотой, то туда его и помещаем). $H(t_i)$ – критерий оценки распределения в зонах монтажного пространства (МП). Размещаемый ЭК необходимо устанавливать на поле платы в зону с минимально возможной для него высотой. Каждая зона задается габаритными размерами h_x, h_y, h_z – длина, ширина и высота зоны поля платы в 3D-пространстве. Каждый компонент задан габаритными размерами s_i, q_i, h_i – длина, ширина и высота размещаемого ЭК.

Для учета распределения в зонах МП платы используется функция:

$$H(t_i) = \min_{t_i \in T} \left(\frac{h_z}{h_i} \right)$$

Применение алгоритма позволит увеличить скорость проектирования ПУ с уменьшением количества ошибок при этом, улучшить эргономические показатели ПУ. Разработанный алгоритм реализован в виде отдельной программы составленной на объектно-ориентированном языке программирования Delphi с использованием среды программирования Delphi 7 (рис.1).

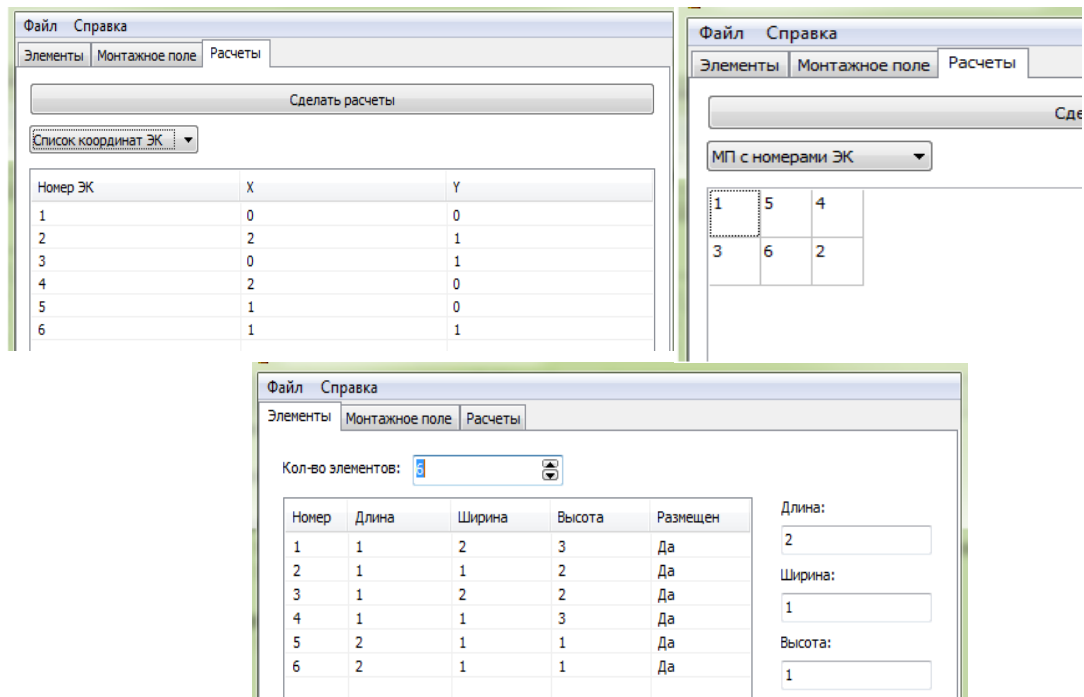


Рис. 1. Результат размещения ЭК в монтажном пространстве платы

В разработанной программе на языке Delphi можно: задавать любое число ЭК, параметры корпуса ЭК (длина, ширина, высота), размеры монтажного пространства, элементы матрицы взвешенных связей, которые берутся из электрической схемы. Матрица расстояний строится автоматически. Результат размещения выводится в двух вариантах: в виде поля платы с номерами размещенных ЭК или в виде таблицы с координатами ЭК в монтажном пространстве платы. В ходе размещения учитываются высоты ЭК и их максимальная связанность между собой.

В основе разработанного метода полного цикла проектирования ПУ лежит модульный принцип с применением трехмерного моделирования для разработки составных частей ПУ. Его предлагается использовать на этапах: разработки библиотек ЭК; конструкции платы и механических деталей (прокладок, радиаторов, угольников и др.); размещения ЭК на плате и осуществления инженерных расчетов.

Исходными параметрами для проектирования объемной модели ПУ являются: входные данные по управлению процессом проектирования и данные служащие механизмом в процессе проектирования [1]. На рис. 2 представлен маршрут проектирования ПУ с использованием 3D-моделирования, основанный на разработанном алгоритме. Один из важных его этапов – разработка библиотеки ЭК, в частности разработка 3D-моделей корпусов ЭК (рис. 3).

Следующий важный этап – разработка 3D-конструктива печатных плат с использованием различных инструментальных средств САПР печатных плат (рис. 4). Применение разработанного метода проектирования ЭУ, основанного на трехмерном моделировании составных частей, позволит уменьшить количество итераций при проектировании, снизить затраты на разработку ПУ, а также повысить наглядность и улучшить качество.

Разработанные алгоритмы 3D-моделирования корпусов ЭК в системе Altium Designer и 3D-конструктива платы полностью описывают все инструментальные возможности САПР для этого вида процедур [2]. Применение данных алгоритмов позволит пользователям за минимальный промежуток времени изучить возможности САПР и сократит время на разработку объемных моделей.

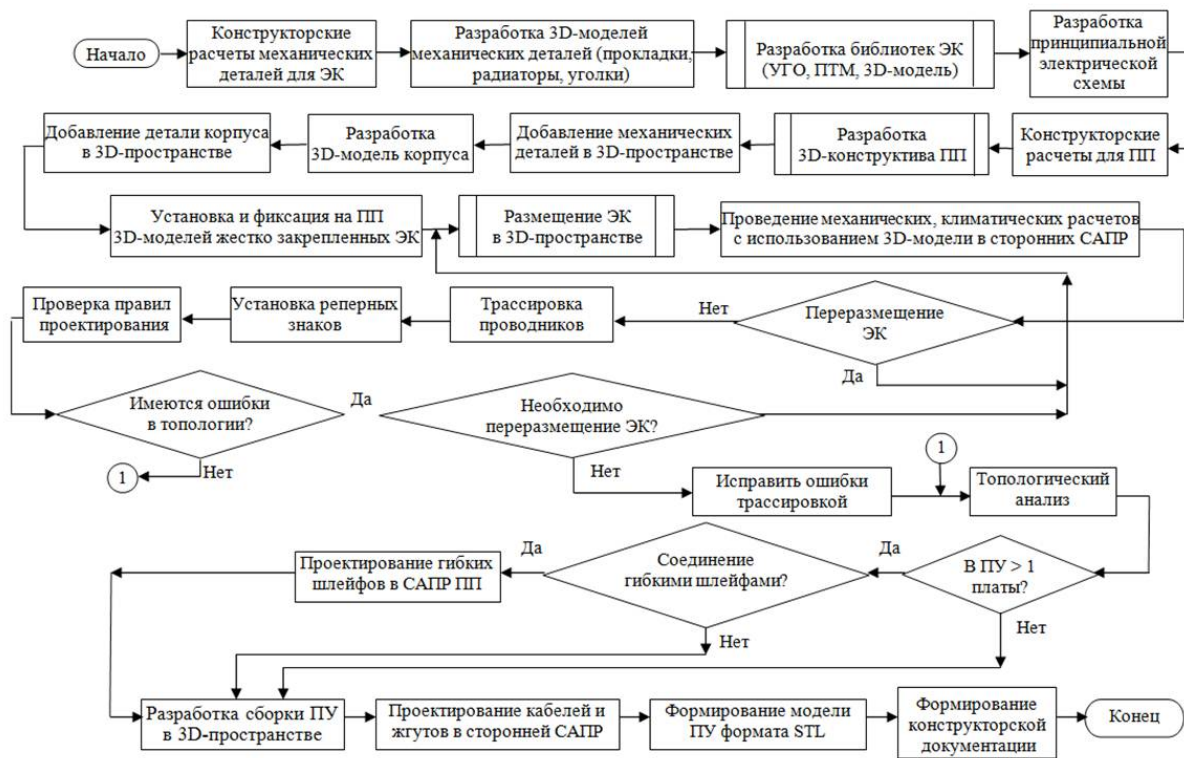


Рис. 2. Маршрут проектирования печатного узла в САПР печатных плат

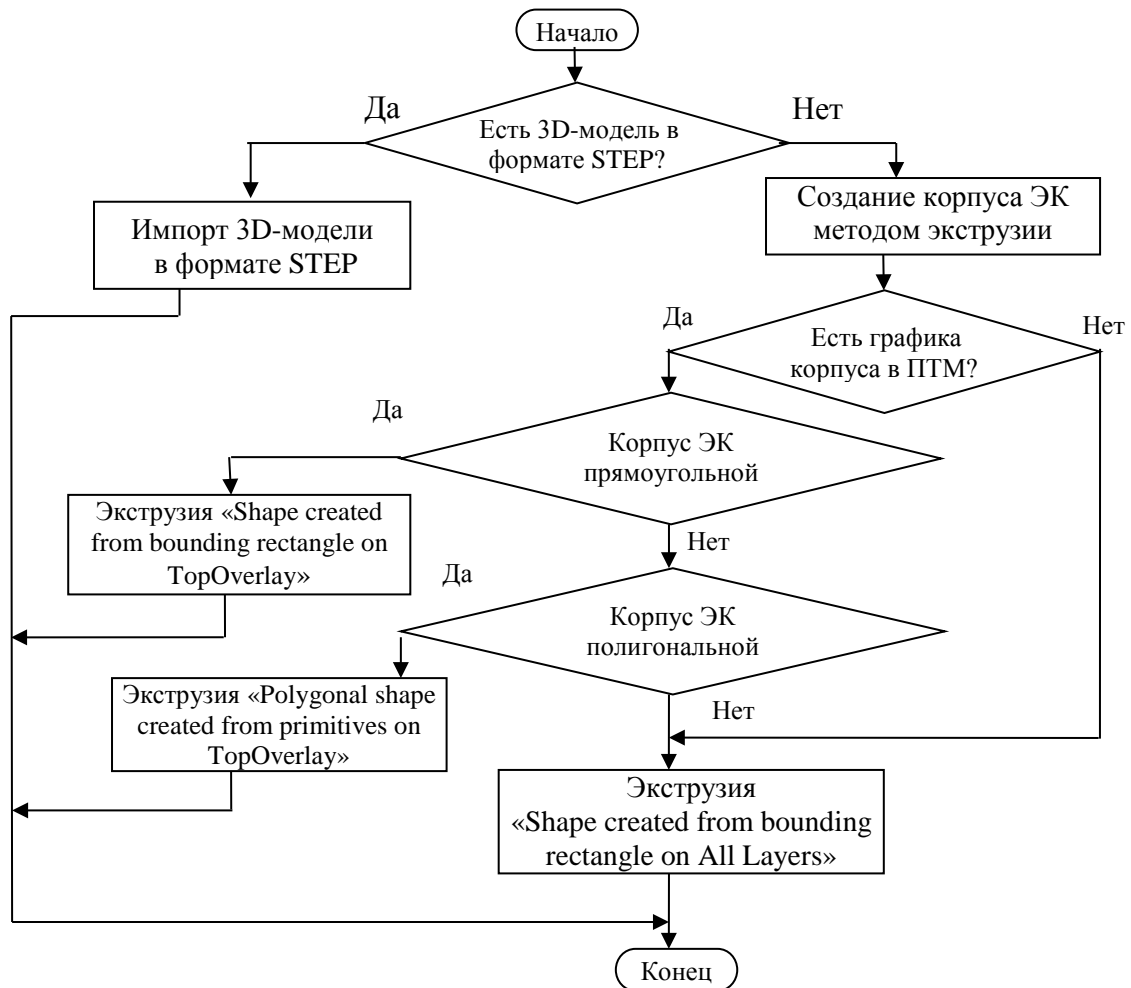


Рис. 3. Структурная схема алгоритма разработки 3D-модели корпуса ЭК в Altium Designer

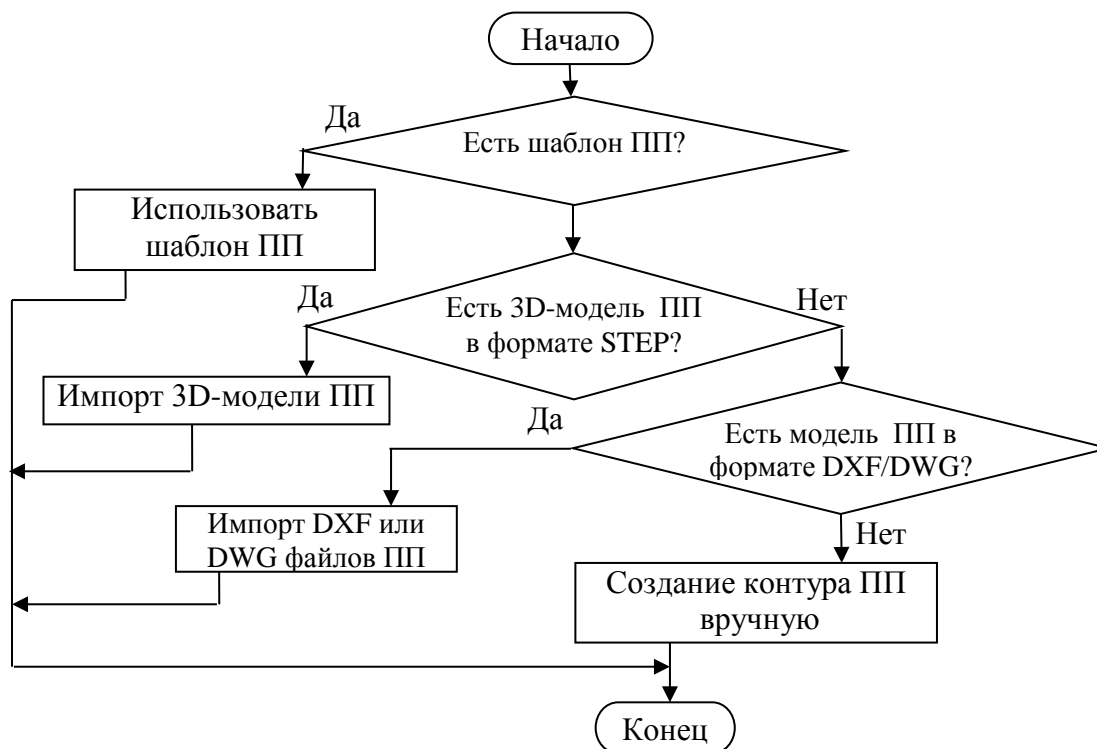


Рис. 4. Структурная схема алгоритма разработки 3D-конструктива платы в системе Altium Designer

Заключение

Использование полученных результатов позволит: значительно увеличить скорость, качество выполнения и реализации проекта ПУ; улучшить качество размещения; учитывать требования к расположению компонентов в трехмерном измерении; уменьшить размеры печатных плат и улучшить условия для последующей трассировки проводников.

Разработанные методы и алгоритмы могут быть использованы при сквозном моделировании ПУ в едином информационном пространстве при формировании прототипов деталей и конструкций электронных устройств, а также для оптимизации различных САПР.

Применение алгоритма позволит увеличить скорость проектирования ПУ, уменьшить количество ошибок на этой стадии, а также автоматизировать размещение корпусов ЭК с учетом их высот. Разработанную программу можно встроить в САПР печатных плат (Altium Designer, CADSTAR) поддерживающих 3D-моделирование, как специализированное программное приложение для размещения электронных компонентов в 3D-пространстве. При использовании разработанного метода появляется возможность автоматизированного контроля установки высоких электронных компонентов в корпус верхнего уровня.

Публикации

1. Кузнецова О.В., Романова Е.Б. Организация библиотек в Altium Designer // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3 (85). С. 160–161.
2. Кузнецова О.В., Романова Е.Б. Алгоритм размещения электронных компонентов на печатной плате // Вестник компьютерных и информационных технологий. М., 2014. № 9. С. 34–39.
3. Кузнецова О.В. Алгоритм размещения электронных компонентов на печатной плате в трехмерном измерении // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 196–197.

Литература

1. Сабунин А.Е. Импорт проектов из различных САПР ПП в программу Altium Designer // Проектирование и моделирование. 2009. № 8. С. 42–49.
2. Иванова Н.Ю., Романова Е.Б. Инструментальные средства конструкторского проектирования электронных средств. Учебное пособие. СПб., 2013. – 121 с.



Лабковская Римма Яновна
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: studsovet_itmo@mail.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМАХ

Р.Я. Лабковская

Научный руководитель – профессор В.Л. Ткалич

Цель работы: анализ статики и динамики мембранных и пластинчатых упругих чувствительных элементов (УЧЭ) систем управления (СУ), а также осуществление разработки ряда новых конструкций коммутационных элементов на их основе. Для достижения поставленной цели надо решить следующие задачи:

- выполнить анализ тенденций и перспектив развития мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ, провести классификацию и исследование их основных рабочих характеристик;
- разработать математические модели УЧЭ СУ в статическом и динамическом режимах;
- разработать библиотеки конечных элементов для автоматизированного проектирования мембранных и пластинчатых УЧЭ;
- провести анализ жесткости, надежности и динамических погрешностей мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ;
- разработать метод повышения надежности мембранных и пластинчатых УЧЭ и провести анализ их динамических погрешностей;
- разработать ряд новых конструкций коммутационных элементов на базе мембранных и пластинчатых УЧЭ;
- создать программное обеспечение для проектирования УЧЭ СУ.

Методы исследования

Полученные результаты базируются на системном подходе к рассматриваемой проблеме и основываются на традиционных численных методах анализа тонкостенных структур. С целью построения математических моделей присоединенных масс в динамическом режиме применены методы теории графов, электромеханических аналогий и сечений. Для построения математических моделей в статическом режиме использованы методы теории вероятности и случайных чисел.

В проекте осуществлена постановка проблемы анализа статики и динамики мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ, выявлены тенденции и перспективы их развития, а также проведена классификация основных видов плоских и мембранных УЧЭ СУ. При

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

этом учитывались такие их параметры, как тип, назначение, материал, конструкция и технология изготовления. Приведены существующие классы мембранных УЧЭ, пластинчатых и термобиметаллических пружин согласно действующему международному патентному классификатору.

Проведен анализ ряда основных рабочих характеристик УЧЭ СУ. Особое внимание уделено упругим характеристикам, жесткости, чувствительности, а также надежности.

Анализ требований, предъявляемых к материалам мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ, проведен с учетом широкого разнообразия областей их использования, характера нагружения, выполняемых функций и условий эксплуатации.

Проанализированы специальные требования к материалам УЧЭ, к которым можно отнести требование высокого сопротивления к микропластическим деформациям, термостойкости, устойчивости к коррозии, высокого/низкого удельного сопротивления, способности к намагничиванию, хорошей паяемости, низкого уровня термомеханических напряжений в спае с аморфными материалами.

Проведен анализ перспектив применения и тенденций развития по вопросу исследования параметров надежности, статики и динамики мембранных и пластинчатых электромеханических элементов СУ.

В работе рассмотрено построение математических моделей исследуемых параметров СУ при равномерном и неравномерном шаге их измерений по шкале аргументов. Также осуществлена разработка и исследование математических моделей исследуемых параметров мембранных и пластинчатых УЧЭ при их периодическом изменении в зависимости от аргументов. Далее осуществлен переход к построению и анализу стохастических моделей УЧЭ СУ. С этой целью рассмотрено понятие случайных функций и обоснованы общие положения статического моделирования стохастических моделей.

В работе приведены и проанализированы характеристики случайных величин, их линейных и стохастических моделей. Осуществлено обоснование основных свойств стохастических моделей и рассмотрение областей приложения их отдельных характеристик. Предложены методы нахождения оценок параметров математических моделей линий регрессий и скедастических линий для мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ в статическом режиме. Рассмотрены вопросы формирования библиотеки конечных элементов для систем автоматизированного проектирования конструкций мембранных и пластинчатых УЧЭ магнитоуправляемых контактов.

В настоящее время широкое применение получили модифицированный элемент, обладающий пятью степенями свободы в узлах, а также изопараметрический элемент, обладающий 36 степенями свободы в узлах, которые относятся к четырехугольным элементам пластин и оболочкам.

К перспективным элементам можно отнести конечные элементы изопараметрического типа, простейшим из которых является криволинейный четырехугольник с девятью степенями свободы в узле. В качестве узловых неизвестных конечного элемента принимаются три компоненты вектора перемещения и их первые производные по координатам произвольной криволинейной системы координат:

$$\{U\}^T = [u_1 \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_2}, u_2 \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_1} \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2}, u_3 \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_1} \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_2}].$$

Здесь u_i ($i = 1, 2, 3$) – составляющие вектора перемещений.

Обосновано, что выполнение последовательного повышения порядка точности аппроксимации поля перемещений обеспечивается за счет увеличения порядка производных в векторе обобщенных узловых перемещений. Благодаря этому появляется возможность повышения точности аппроксимации геометрии оболочки.

При осуществлении выбора конечных элементов стержней, которые составляют единый ансамбль с базовыми конечными элементами пластин и оболочек, необходимо

обеспечение идентичного выбора вектора обобщенных узловых перемещений и аппроксимирующих функций с условием, при котором обеспечивается выполнение общих требований к конечным элементам. Показано, что при использовании моментной схемы конечных элементов происходит повышение точности расчетов деформаций и напряжений мембранных и пластинчатых УЧЭ магнитоуправляемых контактов на 5–7 %.

Осуществлены разработка и исследование математических моделей плоских и мембранных УЧЭ СУ в динамическом режиме, приведен их перечень. Рассмотрены вопросы линеаризации дифференциальных уравнений УЧЭ в динамическом режиме.

В работе приведены решения линейных однородных и неоднородных дифференциальных уравнений. Рассмотрены условие и критерий устойчивости чувствительного элемента. Приведен анализ динамического режима работы УЧЭ с помощью построения передаточной функции, а также амплитудно- и фазочастотных характеристик. Проанализирована взаимосвязь моделей и методов нахождения исследуемых параметров УЧЭ СУ.

В проекте проведен анализ присоединенных масс упругих чувствительных элементов ртутных герконов. С этой целью осуществлено рассмотрение конструктивных особенностей магнитоуправляемых контактов и определены факторы, влияющие на значения присоединенных масс мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ (влияние отрыва жидкости от поверхности и твердых стенок, вид среды, ориентация УЧЭ в пространстве, показатели обтекаемости их формы и конкретной геометрии). В работе предложена уточненная модель расчета присоединенной массы УЧЭ СУ для ртутного геркона, а также математическая модель динамики плоского УЧЭ при работе в вязких средах (для ртутносмачиваемых контактов герконов):

$$\ddot{y} + 2 \frac{n}{m_{\Sigma}} \dot{y} + \frac{\mu}{m_{\Sigma}} \dot{y} |\dot{y}| + p_k^2 y = (F_0/m_{\Sigma}) \cos \omega t,$$

где y – смещение ЧЭ геркона от положения равновесия; \dot{y} , \ddot{y} – соответственно скорость и ускорение смещения ЧЭ геркона; ω – частота внешнего воздействия; n – коэффициент линейного трения; μ – коэффициент нелинейного трения; p_k – k -собственная частота колебаний, при этом $m_{\Sigma} = m_0 + \Delta m$ – уточненная суммарная масса УЧЭ геркона, m_0 – масса сухого контакта. Выражение для присоединенной массы Δm с условием обтекаемости элемента струей ртути запишется в виде:

$$\Delta m = 0,425 \rho d^2 l \left(1 + \frac{d}{2l}\right)^{-1} k_{II} K,$$

где ρ – плотность ртути; d и l – ширина и длина УЧЭ; k_{II} – коэффициент, определяющий влияние свободной поверхности ртути на величину Δm , K – коэффициент, характеризующий форму УЧЭ и герметизирующего баллона, а также их взаимное положение относительно друг друга.

Получено уточненное аналитическое выражение амплитудно-частотных характеристик УЧЭ геркона и представлены зависимости этих характеристик от различных ударных нагрузок. Разработан приближенный матрично-топологический метод анализа динамики пластинчатых УЧЭ, который использует для описания модель с сосредоточенными параметрами. Применяя метод Рэлея можно достигнуть замены системы с распределенными параметрами эквивалентной моделью с сосредоточенными параметрами. Уравнение колебательного процесса пластинчатых УЧЭ в матрично-топологической и символической форме принимает вид:

$$AC_1 A^T \dot{\dot{X}} = A \dot{F},$$

где C_1 – диагональная матрица комплексной жесткости, \dot{F} – вектор-столбец комплексных сил, \dot{X} – вектор-столбец комплексных смещений.

Исходные матрицы A, C, \dot{F} находятся по топологической модели геркона. В результате получим искомые перемещения точек свободного конца контактного сердечника, а также определим их собственные частоты колебаний.

На основе предложенного матрично-топологического метода осуществлена разработка топологической модели геркона для пластинчатых УЧЭ с развернутой плоскостью контактирования.

Разработана матрично-топологическая модель для частотного анализа сложнопрофильных и многозвенных пластинчатых УЧЭ на основе перехода к системе с сосредоточенными параметрами при использовании методов: электромеханических аналогий, Рэлея-Ритца и теории графов. Осуществлено сравнение теоретических результатов расчета собственных частот УЧЭ, полученных матрично-топологическим методом, с соответствующими экспериментальными их величинами при пьезоэлектрическом и оптическом методах исследования. Различие не превышало 7–9 %, следовательно, разработанная математическая модель обладает хорошей адекватностью реальному колебательному процессу в конструкциях герконов. Корректность частотного анализа достигалась применением частотных фильтров Фурье.

Выявлено, что с точки зрения качества УЧЭ его параметрическая надежность в первую очередь зависит от неупругих эффектов материала, которые проявляются в виде гистерезиса, релаксации и ползучести. Погрешности именно от этих эффектов являются причиной нестабильности показаний датчиков во времени и часто ограничивают приборную точность. Следовательно, перспективным направлением является разработка методов, позволяющих понизить степень влияния этих факторов.

Осуществлен анализ жесткости плоских УЧЭ электромеханических устройств систем управления. Рассмотрены пластинчатые УЧЭ герконов с различными схемами нагружения и заделки (с одним свободным концом и с двумя жестко защемленными концами). Также проведен анализ жесткости и собственных частот мембранных УЧЭ СУ на примере разработанных автором работы мембранных герконов. Осуществлено рассмотрение применения методов статики и динамики к анализу надежности работы мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ. С этой целью осуществлена разработка метода повышения надежности мембранного ртутносмачиваемого магнитоуправляемого контакта. Предложенная модификация защищена патентом.

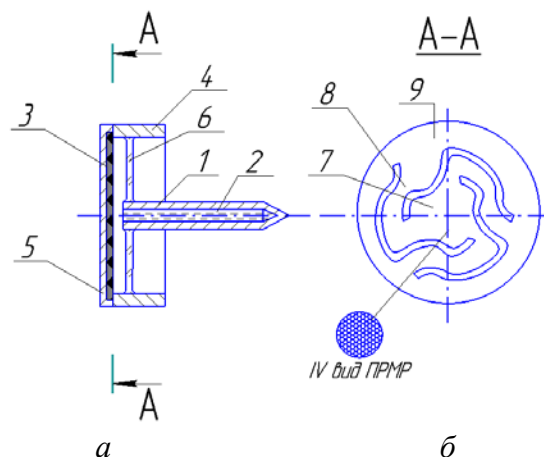


Рис. 1. Мембранный геркон: а – конструкция геркона; б – конструкция мембраны

Мембранный геркон (рис. 1а) содержит неподвижный контакт, выполненный в виде сердечника 1 с внутренней капиллярной полостью 2 и подвижный контакт, выполненный

в виде мембраны 3. Сердечник 1 установлен по оси цилиндрического корпуса, состоящего из кольца 4 и крышки 5 и соединен с ним с помощью стеклянного спая 6.

Мембрана 3 (рис. 1б) предлагаемой конструкции состоит из трех основных элементов: диска 7 с полностью регулярным микрорельефом поверхности IV вида (ГОСТ 24773-81: Поверхности с регулярным микрорельефом) амальгированного ртутью методом центрифугирования и подвешенного на упругих лепестках 8, которые в свою очередь соединены с периферийным кольцевым участком 9. Деформируемые части лепестка содержат дугообразный участок, обращенный выпуклостью к центру мембраны.

Выбранные параметры регулярного микрорельефа рабочей поверхности мембранного УЧЭ геркона позволили достичь повышения чувствительности ЧЭ на 5–7 %, снижения дребезга, увеличения токов коммутации на 6–8 %, что привело к повышению надежности коммутационных элементов данного вида.

В работе осуществлен анализ динамических погрешностей УЧЭ электромеханических устройств СУ при комплексном воздействии динамических нагрузок. Для установления взаимосвязи всех воздействий были выбраны линейные и угловые деформации мембранных и пластинчатых УЧЭ. На основе анализа динамической погрешности УЧЭ в случае комплексного воздействия механо-, гидро-, аэро- и термодинамических нагрузок выведены формулы для расчета взаимосвязи статических погрешностей с комплексными нагрузками и приведено выражение для определения их корреляционной зависимости.

В проекте проведена разработка ряда новых конструкций магнитоуправляемых контактов и коммутационных устройств, используемых в вычислительной технике и системах управления. Данная серия предназначена для систем пожарной и охранной сигнализаций за счет использования в качестве упругого элемента дополнительно введенной термобиметаллической пружины в комбинации с мембранными и пластинчатыми УЧЭ и наличия контактных узлов, осуществляющих передачу светового сигнала. Световой контакт реализуется за счет использования оптоволоконного элемента. УЧЭ в этой серии снабжены наноструктурированной планарной поверхностью, что ведет к повышению износостойкости, понижению и стабилизации переходного контактного сопротивления. Также новая серия магнитоуправляемых контактов включает в себя мембранные ртутносмачиваемые герконы, которые позволяют исключить вибрацию при замыкании и вредное явление дребезга.

Целью разработки полезных моделей являлось повышение надежности, технологичности, расширение эксплуатационных и функциональных возможностей, удешевление конструкции и техпроцесса.

УЧЭ новой серии коммутационных устройств СУ обладают следующими свойствами: повышенной износостойкостью; стабильностью переходного контактного сопротивления; отсутствием спекания и залипания; отсутствием дребезга; наличием световых каналов; отсутствием фреттинг-коррозии; повышенным быстродействием; способностью к реагированию на изменение теплового поля; повышенной чувствительностью (м. д. с. срабатывания); повышенным сроком службы (долговечностью).

Осуществлена разработка структуры программного комплекса автоматизированного проектирования мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ. Показано, что для его формирования необходимо принимать во внимание условия, от выполнения которых зависит эффективность создаваемых алгоритмов расчета сложных конструкций, в частности мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ. К их числу можно отнести стремление к формированию библиотеки из минимального набора конечных элементов различных типов. Данный набор обеспечивает корректное формирование расчетной модели любой конструкции мембранных и пластинчатых УЧЭ из выбранного для анализа класса коммутационных устройств СУ. С помощью математического аппарата с учетом ряда требований был разработан пакет прикладных программ для проектирования мембранных и пластинчатых УЧЭ.

С этой целью:

- рассмотрены структура и организация программного комплекса для автоматизированного проектирования мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ;
- представлены и описаны пакеты прикладных программ, которые составляют данный программный комплекс.

Заключение

В результате проведенного в работе исследования поставленная цель выполнена: проведен анализ статики и динамики мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ и осуществлена разработка новой серии моделей коммутационных элементов на их основе.

Решены следующие задачи:

- осуществлен анализ традиционных и новых типов мембранных и пластинчатых УЧЭ в измерительных приборах и коммутационных устройствах СУ, а также их классификация;
- проведено исследование основных рабочих характеристик мембранных и пластинчатых УЧЭ СУ;
- проанализированы перспективы и тенденции развития устройств на основе УЧЭ СУ;
- осуществлена разработка математических моделей УЧЭ СУ в статическом и динамическом режимах;
- осуществлена разработка библиотеки конечных элементов для автоматизированного проектирования мембранных и пластинчатых УЧЭ;
- проведен анализ жесткости мембранных и пластинчатых УЧЭ в электромеханических элементах СУ;
- осуществлена разработка метода повышения надежности мембранных и пластинчатых УЧЭ и осуществлен анализ их динамических погрешностей;
- осуществлена разработка серии новых моделей коммутационных элементов на базе мембранных и пластинчатых УЧЭ;
- созданы пакеты прикладных программ для проектирования УЧЭ СУ проектирования.

Публикации

1. Лабковская Р.Я. Разработка математической модели расчета тонкостенных упругих чувствительных элементов систем управления // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе. Сборник материалов научно-практической конференции с международным участием. Ч. 1. Йошкар-Ола, 2013. С. 176–183.
2. Лабковская Р.Я. Исследование статики и динамики мембранных и пластинчатых электромеханических элементов систем управления // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 202–203.
3. Лабковская Р.Я. Разработка библиотеки конечных элементов для САПР упругих конструкций герконов // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 3. С. 21–24.
4. Лабковская Р.Я. Разработка математических моделей упругих чувствительных элементов систем управления // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров НИУ ИТМО. СПб., 2011. С. 97–98.
5. Патент на изобретение РФ 2014111614/07 «Мембранный геркон», опубл. 20.08.14.



Макеев Илья Владимирович
 Естественнонаучный факультет
 Кафедра высшей математики
 E-mail: ilya.makeev@gmail.com

ЭТАЛОННЫЕ РЕШЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

И.В. Макеев

Научный руководитель – профессор И.Ю. Попов

В геофизике для моделирования течений мантии Земли используются различные численные алгоритмы [1], [2]. Важный элемент численного моделирования – оценка качества их работы. Распространенным подходом при оценивании является сравнение численных алгоритмов между собой, а также сравнение численного решения с аналитическим некоторой тестовой задачи [3].

Целью работы является построение аналитических решений уравнений Стокса с переменной вязкостью в цилиндрической системе координат, которые могут быть использованы для оценки качества работы численных алгоритмов. В работе решаются две задачи. Первой является получение в явном виде решений уравнений Стокса с переменной вязкостью и плотностью для случая, когда переменные в уравнениях являются функциями, зависящими от одной координаты r в цилиндрической системе координат. Второй задачей является вывод численной схемы для многосеточного метода решения уравнений Стокса с переменной вязкостью в цилиндрической системе координат.

В цилиндрических координатах (r, φ, z) Стоксово течение жидкости с переменной вязкостью и плотностью задается уравнениями:

$$\begin{aligned} (\nabla \cdot \sigma)_r &= -\rho G_r \\ (\nabla \cdot \sigma)_\varphi &= -\rho G_\varphi \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (\nabla \cdot \sigma)_z &= -\rho G_z \\ \nabla(\rho v) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sigma(v)$ – тензор напряжений, η – вязкость жидкости, ρ – плотность жидкости, G – сила тяжести, v – вектор скорости, P – давление жидкости.

Пусть $v_r = v_r(r)$, $v_\varphi = v_\varphi(r)$, $v_z = v_z(r)$, $P = P(r)$, $\eta = \eta(r)$, $\rho = \rho(r)$, $G = G(r)$. В этом случае, решив уравнения (1) и (2) находим компоненты скорости и давление:

$$v_r = \frac{c}{r\rho}, \quad (3)$$

$$v_\varphi(r) = c_1 f(r) + c_2 r + C_1(r) f(r) + C_2(r) r, \quad (4)$$

$$v_z = -\int_1^r \frac{1}{\eta r_2} \left(\int_1^{r_2} r_1 \rho G_z dr_1 + c_1 \right) dr_2 + c_2, \quad (5)$$

$$P(r) = \int (\rho G_r + 2\eta \frac{1}{r} v_r' + 2\eta' v_r' + 2\eta v_r'' - 2\eta \frac{1}{r^2} v_r) dr, \quad (6)$$

где $f(r) = \exp\left(\int_1^r \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{\eta r_2^3} \frac{1}{\int_1^{r_2} \frac{1}{\eta r_1^3} dr_1 + C}\right) dr_2\right)$,

$$C_1(r) = \int \frac{r \rho G_\varphi}{\eta(f - f'r)} dr, \quad C_2(r) = -\int \frac{f \rho G_\varphi}{\eta(f - f'r)} dr.$$

В работе предложена реализация численной схемы для многосеточного метода [1] решения уравнений Стокса с переменной вязкостью в цилиндрической системе координат. При построении решения в многосеточных методах используется последовательность сеток с различным разрешением и процедура перехода от одной сетки к другой.

На каждой из сеток решение уравнений (1), (2) будем строить при помощи метода Гаусса-Зейделя. Для уравнений Стокса и неразрывности имеем следующую итерационную процедуру вычисления компонент скорости и давления:

$$P_{(i,j,l)}^{new} = P_{(i,j,l)} + \eta_{n(i,j,l)} \Delta R_{i,j,l}^{continuity} \theta_{relaxation}^{continuity},$$

$$\Delta R_{i,j,l}^{continuity} = R_{i,j,l}^{continuity} - \frac{v_r}{r} - \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (7)$$

$$v_{r(i,j,l)}^{new} = v_{r(i,j,l)} + \frac{\Delta R_{i,j,l}^{r-Stokes}}{C_{v_r(i,j,l)}} \theta_{relaxation}^{Stokes}, \quad (8)$$

$$v_{\varphi(i,j,l)}^{new} = v_{\varphi(i,j,l)} + \frac{\Delta R_{i,j,l}^{\varphi-Stokes}}{C_{v_\varphi(i,j,l)}} \theta_{relaxation}^{Stokes}, \quad (9)$$

$$v_{z(i,j,l)}^{new} = v_{z(i,j,l)} + \frac{\Delta R_{i,j,l}^{z-Stokes}}{C_{v_z(i,j,l)}} \theta_{relaxation}^{Stokes}, \quad (10)$$

где $\theta_{relaxation}^{continuity}$, $\theta_{relaxation}^{Stokes}$ – коэффициенты релаксации уравнений Стокса и неразрывности.

Выражения для вычисления остатков в формулах (8), (9) и (10) могут быть записаны в форме:

$$\Delta R_{i,j,l}^{r-Stokes} = R_{i,j,l}^{r-Stokes} - \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} - \frac{\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial \varphi} - \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (11)$$

$$\Delta R_{i,j,l}^{\varphi-Stokes} = R_{i,j,l}^{\varphi-Stokes} - \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} - \frac{2\tau_{r\varphi}}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} - \frac{\partial \tau_{z\varphi}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi}, \quad (12)$$

$$\Delta R_{i,j,l}^{z-Stokes} = R_{i,j,l}^{z-Stokes} - \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} - \frac{\tau_{rz}}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial \varphi} - \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (13)$$

где τ – девиаторный тензор напряжений, компоненты которого в цилиндрических координатах имеют вид:

$$\begin{aligned} \tau_{rr} &= 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r}; & \tau_{\varphi\varphi} &= 2\eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r} \right); & \tau_{zz} &= 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z}; \\ \tau_{r\varphi} &= \eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right); & \tau_{rz} &= \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right); & \tau_{\varphi z} &= \eta \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} \right). \end{aligned}$$

Будем использовать шаблон (рис.1) для замены производных на конечные разности в уравнении неразрывности. Для уравнения (7) получим следующую дискретизацию:

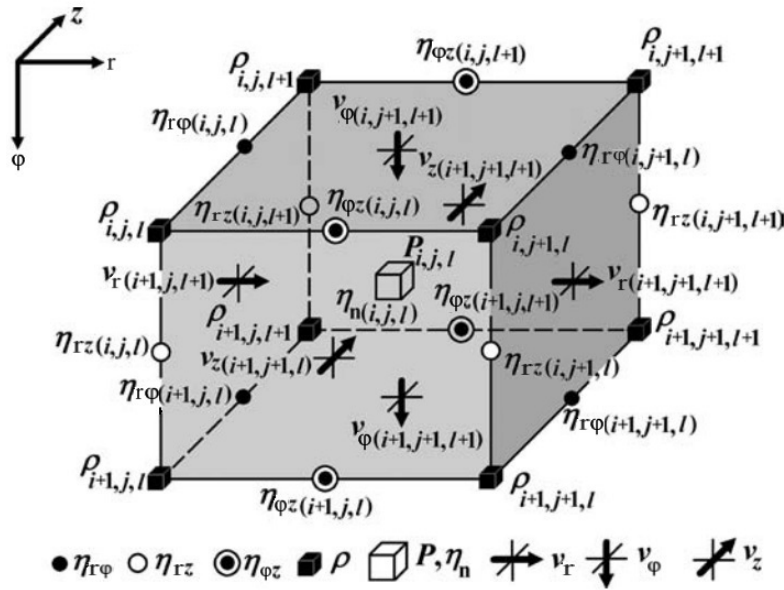


Рис. 1. Ячейка трехмерной сетки, вводимой для уравнений Стокса

$$\Delta R_{i,j,l}^{continuity} = R_{i,j,l}^{continuity} - \frac{1}{r_j + \Delta r / 2} \frac{v_{r(i+1,j+1,l+1)} + v_{r(i+1,j,l+1)}}{2} - \frac{v_{r(i+1,j+1,l+1)} - v_{r(i+1,j,l+1)}}{\Delta r} - \frac{1}{r_j + \Delta r / 2} \frac{v_{\phi(i+1,j+1,l+1)} - v_{\phi(i,j+1,l+1)}}{\Delta \phi} - \frac{v_{z(i+1,j+1,l+1)} - v_{z(i+1,j+1,l)}}{\Delta z}$$

Аналогичным образом может быть выписана дискретизация для формул (8), (9) и (10).

Для тестирования предложенной численной схемы выполним сравнение численного решения с точным решением уравнений Стокса, которое задается формулами (3), (4), (5) и (6). Выделим некоторую область в форме прямоугольного параллелепипеда в координатах (r, ϕ, z) . На границе параллелепипеда зададим значения для скоростей и давления, вычисленные по формулам (3), (4), (5) и (6). Внутри области решим уравнения Стокса и неразрывности численно, используя предложенную схему для многосеточного метода. В силу теоремы единственности полученное численное решение должно совпадать с аналитическим. Сравнив численное решение с аналитическим, можно оценить качество работы численной схемы.

Рассмотрим решение уравнений Стокса при следующих условиях:

$$\rho = const, \eta = r^2, \\ G_r = 0, G_\phi = 0, G_z = 0.$$

В этом случае получим следующее частное решение уравнений (1), (2):

$$v_r = -\frac{1}{r} \\ v_\phi = \frac{1}{r^3}, \\ v_z = \frac{1}{2} \frac{1}{r^2} \\ P(r) = 4 \ln(r).$$

Выбранный параллелепипед задается условиями: $1 \leq r \leq 2, 0 \leq \phi \leq 1, 0 \leq z \leq 1$.

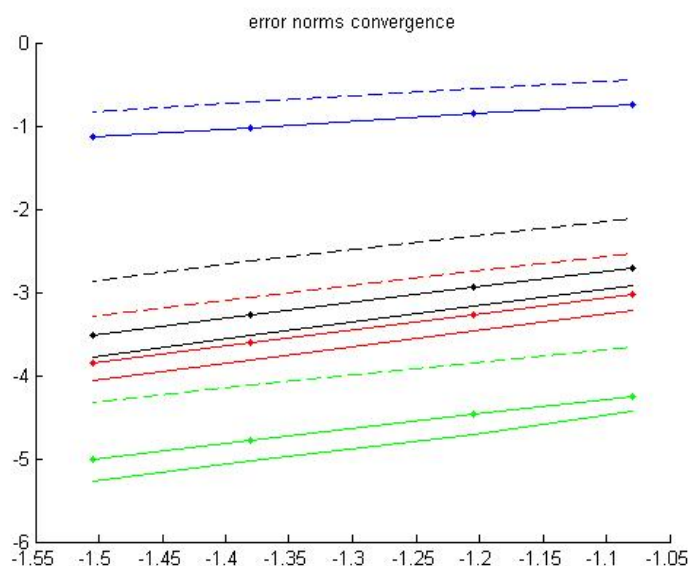


Рис.2. Изменение относительной ошибки: синяя линия – давление; красная – v_r , черная – v_φ ; зеленая – v_z ; сплошная – ошибка типа L_1 ; пунктирная – ошибка типа L_∞ ; сплошная линия с точками – ошибка типа L_2

На рис. 2 показана зависимость относительной ошибки многосеточного метода (вертикальная ось) от величины шага сетки (горизонтальная ось) в логарифмическом масштабе. Положительный наклон линий свидетельствует о сходимости численного решения к аналитическому.

Заключение

В работе получены явные решения уравнений Стокса с переменной плотностью и вязкостью в цилиндрической системе координат. Такие решения могут найти применение при оценке качества работы различных численных методов, используемых для решения уравнений Стокса в геофизике и гидродинамике. В работе также предложен вариант реализации численной схемы для многосеточного метода решения уравнений Стокса с переменной вязкостью в цилиндрической системе координат. Эффективность данной схемы была проверена путем сравнения численного решения с аналитическим. Предложенная схема может быть использована при численном моделировании медленных течений в геофизике.

Публикации

1. Попов И.Ю., Макеев И.В. A benchmark solution for 2D Stokes flow over cavity // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik. 2014. Vol. 65. No 2. P. 339–348.
2. Макеев И.В. Математическое моделирование течения жидкости, вызванного движением части границы // Труды студенческого центра прикладных математических исследований. Т. 2. СПб., 2012. С. 76–82.
3. Макеев И.В. Решения уравнений Стокса для осесимметричных систем // Труды студенческого центра прикладных математических исследований. Т. 3. СПб., 2013. С. 66–69.

Литература

1. Gerya T.V. Introduction to Numerical Geodynamic Modelling. 2010. – 345 p.
2. Tackley J.P., Ismail-Zadeh A. Computational Methods for Geodynamics. 2010. – 332 p.
3. Попов И.Ю., Лобанов И.С., Попов С.И., Попов А.И., Герыа Т.В. Practical analytical solutions for benchmarking of 2-D and 3-D geodynamic Stokes problems with variable viscosity // Solid Earth. 2014. Vol. 5. No 1. P. 461–476.



Малашин Роман Олегович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра компьютерной фотоники и видеoinформатики
E-mail: malashinroman@mail.ru

МЕТОДЫ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИСТОГРАММ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК

Р.О. Малашин

Научный руководитель – профессор В.Р. Луцив

При получении фотоснимка происходит потеря информации о дальности до объектов сцены. Из-за этого во многих задачах принято аппроксимировать форму исследуемых объектов плоскостью, что позволяет абстрагироваться от трехмерного происхождения изображений. Методы, использующие это упрощение, не применимы для анализа объектов сложной формы [1]. Дополнительные трудности вызывают ситуации, когда требуется распознавать не отдельные объекты, а всю трехмерную сцену целиком, поскольку ее тяжело представить в виде небольшого числа эталонных изображений. В таких условиях могут быть полезны локальные признаки [2, 3, 4], так как они в меньшей степени чувствительны к ракурсным искажениям, чем глобальные описания изображений.

Целью работы являлась разработка математических методов и алгоритмов, обеспечивающих повышение вероятности корректного распознавания изображений трехмерных сцен. Для обеспечения быстродействия алгоритмов при работе с базами данных (БД) эталонных изображений были использованы гистограммы ключевых точек (ГКТ) (мешки или гистограммы визуальных слов (bag of words)).

Методология

Поиск изображений трехмерных сцен в базе данных с использованием ГКТ. В работе была рассмотрена задача поиска изображений трехмерных сцен в БД. Для увеличения быстродействия использована концепция визуальных слов, в рамках которой изображения (по аналогии с текстом) описываются с помощью ГКТ, а также словаря визуальных слов [5].

При использовании ГКТ анализ изображений, как правило, включает следующие этапы: поиск ключевых точек (КТ) на изображениях; их описание (построение дескрипторов КТ); отнесение каждого дескриптора к определенному визуальному слову и учет распределения визуальных слов на изображениях (составление ГКТ). Две ГКТ могут быть сравнены друг с другом непосредственно, без привлечения дескрипторов КТ, что позволяет описывать изображения очень компактно. Например, при работе с БД из 1000 изображений и использовании дескрипторов SIFT-128 [4] общее количество требуемой памяти снижается более чем на порядок (при условии использования словаря визуальных слов небольшого размера).

В классической концепции визуальных слов сопоставление изображений осуществляется без учета положения ключевых точек на изображении, что позволяет системе быть устойчивой, если объект имеет сильноизменчивую форму, но понижает ее различающие способности. Для преодоления этого недостатка было предложено генерировать сопоставления КТ по двум ГКТ и на их основе проводить структурный анализ (СА). Для возможности генерации сопоставлений дополнительно к ГКТ необходимо сохранять информацию о параметрах КТ, в области которых были рассчитаны визуальные слова. После этого ячейки гистограмм, соответствующие друг другу, можно интерпретировать как сопоставления групп ключевых точек двух изображений (рис. 1).

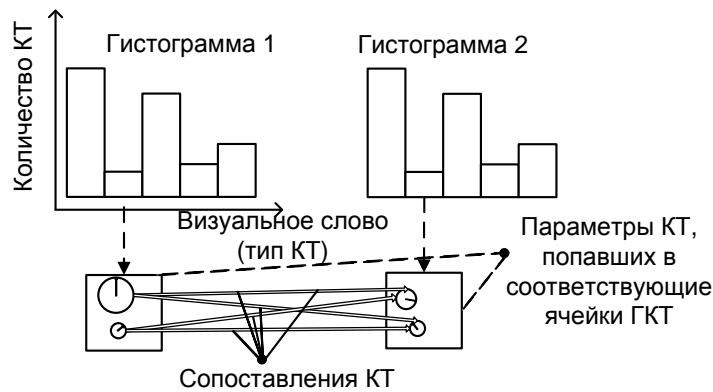


Рис. 1. Генерация сопоставлений КТ по двум ГКТ

Необходимо отметить, что по двум ГКТ можно получать сопоставления КТ быстрее, чем за счет сравнения их дескрипторов.

Учет геометрии трехмерной сцены. В силу различных причин подавляющая часть сопоставлений КТ, сгенерированных по двум ГКТ, оказывается ошибочной. Для получения хороших результатов необходимо максимально учитывать пространственное положение сопоставленных локальных признаков, что позволит исключить ошибочные сопоставления. В настоящее время применяемые на практике методы учета геометрии трехмерных сцен не позволяют достичь требуемой в практических приложениях точности, робастности и скорости сопоставления изображений. В рамках данного проекта был адаптирован подход, используемый для обнаружения объектов [4], который основан на кластеризации локальных преобразований группы подобия (ППГ). Такой подход возможен, поскольку каждый признак характеризуется положением, ориентацией и размером соответствующего участка изображения. Таким образом, пара соотнесенных признаков задает взаимный разворот, масштаб и смещение, то есть преобразование группы подобия. Идея заключается в том, что локальные сопоставления, которые соответствуют реальным объектам сцены (являются корректными) будут образовывать кластеры в пространстве ППП, а некорректные – будут распределяться в нем равномерно.

Кластеризация осуществляется путем проведения преобразования Хафа – каждое сопоставление наращивает счетчик определенной ячейки четырехмерной таблицы (аккумулятора). После этого рассматриваются только кластеры достаточно больших размеров, а прочие – исключаются из рассмотрения.

Теоретические расчеты и практические эксперименты показали, что ожидаемое количество ложных (образованных в результате случайных процессов) кластеров очень велико, и необходима быстрая и надежная процедура верификации кластерных гипотез, которая позволила бы удалить ложные, а также исключить ошибочные сопоставления из «корректных» кластеров.

Это можно сделать, восстановив параметры какого-либо преобразования по координатам КТ с помощью метода наименьших квадратов [4] и удалив локальные соответствия, не согласующиеся с этими параметрами. Однако исследования показали, что лучших результатов можно добиться, если проводить верификацию с помощью методов, основанных на случайных выборках (RANSAC), причем в пространстве параметров ППП (а не более общих преобразований). Низкая вычислительная сложность алгоритма достигается за счет проверки случайных выборок сопоставлений на их согласованность по параметрам между собой и с параметрами восстановленного по ним преобразования.

В работе был предложен альтернативный способ преодоления «граничного эффекта», возникающего при проведении преобразования Хафа. Для этого используются нескольких аккумуляторов, смещенных в пространстве параметров по каждому измерению на длину половины ячейки таблицы. Эксперименты показали, что при частичном игнорировании граничного эффекта (использовании только двух аккумуляторов) возможно значительное

повышение быстродействия программы за счет уменьшения количества ложных кластеров, которые необходимо верифицировать. При этом в соответствии с экспериментами наблюдалось уменьшение количества корректно сопоставленных изображений лишь на 0,3 %.

Помимо большей устойчивости к ошибкам, предлагаемый подход с использованием кластерного анализа имеет ряд преимуществ перед использованием глобальных ограничений на положение КТ, накладываемых, например, эпиполярной геометрией. В частности, допускается изменение положения отдельных объектов в сцене, что позволяет распознавать динамические сцены и следить сразу за несколькими объектами одновременно.

Результаты

Для того чтобы провести тестирование разработанных алгоритмов, была составлена БД из 350 изображений (размером 640×480), снятых внутри помещений. Были проанализированы 352 пары изображений трехмерных сцен, для которых посредством ручной маркировки были рассчитаны эталонные фундаментальные матрицы, используя которые проверялось, лежат ли автоматически сопоставленные КТ на соответствующих эпиполярных линиях. Для сравнения возможностей разных методов использовались следующие критерии: среднее отклонение сопоставленных КТ от эталонных эпиполярных линий (Δ); пропорция корректных сопоставлений (находящихся вблизи эталонных эпиполярных линий) (α); количество «правильно сопоставленных пар изображений», на которых корректных сопоставлений КТ больше 50 % (N).

Для обнаружения и описания локальных признаков использовался алгоритм SURF [3], а для получения ГКТ – словарь визуальных слов (из двух тысяч слов), рассчитанный заранее по всей БД. В Табл. 1 приведены результаты сопоставления изображений.

Таблица 1

Результаты сравнения разных алгоритмов сопоставления ключевых точек

Метод детекции	Метод описания	Метод сопоставления	N, ед.	α, %	Δ, пикс.
SURF	SURF	Эпиполярная геометрия	205	53,76	106,92
SURF	SURF	Кластерный анализ	309	83,09	33,10
SURF	BoW(SURF)	Кластерный анализ	273	88,37	20,12

Из таблицы следует, что разработанный метод учета структурных связей, основанный на кластерном анализе, значительно превосходит известный метод, основанный на восстановлении эпиполярной геометрии. При использовании ГКТ (BoW(SURF)) было корректно сопоставлено меньшее количество изображений (273 «true positives» вместо 309), чем при использовании непосредственно дескрипторов двух изображений (SURF). Однако при этом достоверность полученных локальных сопоставлений выше (11,6 % ошибок вместо 16,9 %). Это позволяет говорить о том, что снижается вероятность «ложной тревоги» (ошибки первого рода). Таким образом, даже несмотря на уменьшение количества выявленных соответствий, можно заключить, что передоложенный алгоритм генерации сопоставлений по ГКТ позволяет получать корректные результаты и может быть использован, по крайней мере, в задачах, в которых критичны время и объем занимаемой памяти. Кроме того, существует потенциал для развития подхода за счет использования более изощренных способов построения словаря визуальных слов, например, путем предварительного выявления слов нестабильных к ракурсным искажениям с последующим исключением их при проведении структурного анализа.

Результат работы алгоритмов сопоставления при использовании ГКТ приведен на рис. 2.

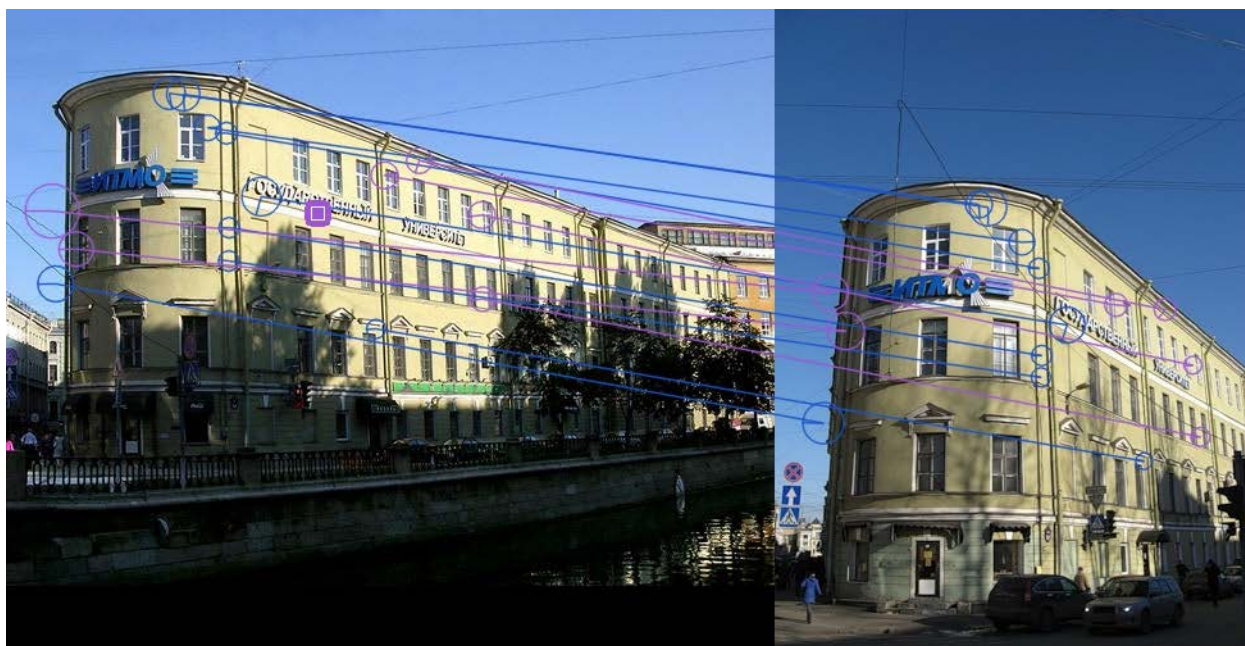


Рис.2. Автоматически отобранные сопоставления КТ, сгенерированные по двум гистограммам ключевых точек

Для того чтобы продемонстрировать возможность сочетания алгоритмов, использующих ГКТ, с алгоритмами СА при решении задачи поиска изображения в БД, была составлена БД изображений трехмерных сцен состоящая из 300 изображений размером 640×480 . Из них были извлечены описания ГКТ, параметры КТ и их индексы. Для непосредственного сравнения двух ГКТ использовались не сами гистограммы, а мера $TF.IDF$, учитывающая «важность» слова в изображении:

$$TF_{ij} = \frac{f_{ij}}{\max_k f_{kj}}, \quad (1)$$

$$IDF_i = \log_2(N / n_i), \quad (2)$$

$$TF.IDF = TF_{ij} \times IDF_i, \quad (3)$$

где f_{ij} – частота (количество появлений) слова i в изображении j , n_i – количество изображений, содержащих слово i . Для сравнения двух векторов $TF.IDF$ использовался коэффициент корреляции Пирсона, который показал лучшие результаты по сравнению с использованием расстояния в евклидовом многомерном пространстве.

В Табл. 2 приведены результаты поиска 44 тестовых изображений в БД с использованием ГКТ совместно с предлагаемыми методами СА (ГКТ+СА) и с использованием только ГКТ. Они получены при верификации одного и двадцати изображений, ближайших к тестовому, с точки зрения меры $TF.IDF$.

Таблица 2

Поиск изображений в базе данных

Метод	Запросов	Распознано	Ошибочно распознано	Принято решений об отсутствии в БД
ГКТ	44	22	22	0
ГКТ+СА(1)	44	21	1	22
ГКТ+СА(20)	44	30	2	12

Эксперименты подтвердили высокие скоростные характеристики разработанных алгоритмов. Генерация сопоставлений и проведение структурной верификации двух ГКТ на стационарном компьютере занимает в среднем 3 мс. Без учета времени, требующегося для обнаружения и описания КТ на тестовом изображении, обработка запроса в БД из 300 изображений с помощью ГКТ занимает около 30 мс. Таким образом, при учете структурных связей на одном изображении общее время поиска составило в среднем 33 мс, а при учете структурных связей на 20-и изображениях – 90 мс.

Заключение

Разработаны математические методы и алгоритмы, обеспечивающие повышение вероятности корректного распознавания изображений трехмерных сцен. При этом получен ряд теоретически и практически значимых результатов.

1. Для поиска изображений в БД предложено дополнять концепцию визуальных слов с помощью проведения кластерного анализа параметров сопоставленных КТ. При этом генерацию сопоставлений КТ предлагается проводить, используя непосредственно две ГКТ.

2. Для обеспечения быстродействия алгоритмов кластерного анализа предложено частично игнорировать граничный эффект, возникающий при проведении преобразования Хафа, с помощью использования двух аккумуляторов, сдвинутых относительно друг друга в пространстве параметров на длину половины ячейки в каждом измерении.

3. Предложенные методы позволяют сократить время работы алгоритмов распознавания в задачах с использованием достаточно больших БД без существенного снижения надежности распознавания. Использование ГКТ для описания изображений позволяет сэкономить память, необходимую для хранения БД, что может быть чрезвычайно полезно в мобильных системах, поскольку снижается стоимость, габариты и энергопотребление разрабатываемых устройств.

4. Эксперименты показали, что при поиске изображений трехмерных сцен с помощью ГКТ проведение структурной верификации обеспечивает уменьшение ошибок второго рода на 36 % и десятикратное уменьшение ошибок первого рода.

Публикации

1. *Malashin R.* Matching of aerospace photographs with the use of local features [Electronic resource] // *Journal of Physics: Conference Series.* 2014. Vol. 536. P. 01218. URL: http://iopscience.iop.org/1742-6596/536/1/012018/pdf/1742-6596_536_1_012018.pdf (дата обращения: 21.09.2014).

2. *Луцив В.Р., Малашин Р.О.* Объектно-независимый структурный анализ изображений: история и современные подходы // *Оптический журнал.* 2014. Т.81. № 11. С. 31–44.

3. *Малашин Р.О.* Сопоставление изображений трехмерных сцен с помощью кластеризации сопоставленных локальных признаков посредством преобразования Хафа // *Оптический журнал.* 2014. Т. 81. № 6. С. 34–42.

4. *Малашин Р.О.* Методы сопоставления изображений трёхмерных сцен // II конференция молодых ученых и специалистов «Будущее оптики-2013». Сборник трудов. СПб., 2013. С. 42–45.

Литература

1. *Луцив В.Р.* Автоматический анализ изображений. Объектно-независимый структурный подход. Саарбрюккен, 2011. – 300 с.

2. *Ortiz R., Vandergheynst P.* FREAK: Fast Retina Keypoint // *Proceedings of the 25th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 2012. P. 510–517.

3. *Bay H., Tuytelaars T., Gool L.* SURF: Speeded Up Robust Features // *Computer Vision –ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 7–13, 2006. Proceedings. Part I.* 2006. P. 404–417.

4. Lowe D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 60. № 2. P. 91–110.
5. Csurka G., Dance C., Fan L., Willamowski J., Bray C. Visual categorization with bags of keypoints // *ECCV Workshop on Statistical Learning for Computer Vision*. 2004. Vol. 1. № 22. P. 1–22.



Марцуков Алексей Александрович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра компьютерной фотоники и видеoinформатики
E-mail: martsukov@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ АТОМНО-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОМПОНЕНТОВ УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ НА СПЕКТРОМЕТРЕ С ПЗС-ЛИНЕЙКАМИ

А.А. Марцуков

Научный руководитель – профессор Р.К. Мамедов

Объектом исследований являются атомно-эмиссионные спектральные (АЭС) приборы с позиционно-чувствительными детекторами в качестве приемников оптического излучения.

Цель работы – исследование параметров приборов, определяющих их аналитические возможности и метрологические характеристики, которыми являются пределы обнаружения и сходимость результатов анализов химического состава измеряемых образцов. До настоящего времени практических исследований параметров, которые могли бы подтвердить или опровергнуть эффективность применения позиционно-чувствительных детекторов в качестве приемников излучения в серийных АЭС-приборах, не проводилось.

При выполнении работ в качестве инструментального метода использовался метод АЭС анализа. Исследования проводились в аналитической лаборатории производственного предприятия ЗАО «Спектральная лаборатория» с целью установления пределов обнаружения и сходимости АЭС измерений с использованием приборов, укомплектованных ПЗС-линейками в качестве приемников излучения. Эксперименты выполнялись на опытном образце атомно-эмиссионного прибора «МСА-V» производства ЗАО «Спектральная лаборатория» с десятью ПЗС-линейками.

В роли источника возбуждения использовался спектр низковольтной искры. Он определялся, исходя из следующих соображений [1, 2, 3]:

- обеспечение относительно высокой энергии атомизации;
- возможность изменения экспериментальных условий за счет регулировки напряжения искры в пределах 10–15 кВ повышающим трансформатором;
- создание факела (плазма, возбужденная искрой) с температурой порядка 10000 К, вполне достаточной для возбуждения спектров широкой номенклатуры анализируемых элементов пробы, в том числе металлов.

Первоначально были выполнены исследования пределов обнаружения элементов в различных пробах, реализуемые на испытуемом образце прибора. В экспериментах в качестве объектов анализа использовались государственные стандартные образцы (ГСО), используемые для калибровки АЭС-приборов на стандартные марки сталей, чугунов, алюминиевых и медных сплавов. В процессе измерений анализировались пределы

обнаружения элементов указанных в графе 2 Табл. 1 для сплавов сталей и чугунов, алюминиевых и медных сплавов. Они полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к приборам такого класса, исходя из химического состава сплавов применяемых в промышленности.

Таблица 1

Результаты исследования пределов обнаружения элементов в различных пробах, полученных на атомно-эмиссионном приборе «МСА-V»

№ п/п	Наименование аналитической линии элемента	Стали и чугуны	Алюминиевые сплавы	Медные сплавы
1	2	3	4	5
1	C	0,001–4,5		
2	S	0,002–0,3		0,002–0,3
3	P	0,002–1,0		0,002–1,0
4	Cu1	0,1–4,0	0,05–12,0	
5	Cu2			Основа
6	Mn	0,05–5	0,002–2,0	0,002–7,0
7	Si1	0,005–5	0,002–12,0	0,002–5,0
8	Cr1	0,005–5	0,001–0,5	0,002–5,0
9	Cr2	0,01–35		
10	Ni1	0,005–5	0,002–4,0	0,005–4,0
11	Ni2	0,5–45,0		
12	Fe1	Основа		
13	Fe2		0,002–1,5	0,002–8,0
14	V	0,002–10,0	0,002–0,3	
15	Ti	0,002–3,0	0,002–0,3	
16	W	0,005–20,0		
17	Al	0,005–2,0	Основа	0,001–12,0
18	Co	0,005–10,0		0,005–2,0
19	Mo	0,005–10,0		0,005–1,0
20	Mg1	0,001–0,5		0,002–1,0
21	Mg2		0,05–12,0	
22	Zn		0,001–10,0	0,001–45,0
23	Sn	0,002–0,5	0,002–15,0	0,002–0,3
24	Pb	0,005–0,5	0,005–1,0	0,005–15,0

Далее были выполнены исследования сходимости аналитических измерений, выполненных на приборе «МСА-V». Они базировались на результатах анализа углеродистых и легированных сталей по углероду. В этих экспериментах в качестве программного обеспечения использовалось универсальная программа «Grad 5», разработанная в ЗАО «Спектральная лаборатория» для любых моделей АЭС-анализаторов. Алгоритм программы, исходя из относительной интенсивности излучения элементов, рассчитывает их концентрацию, полученную на приемнике прибора после прохождения через оптическую систему с помощью строящихся в программном обеспечении градуировочных графиков зависимости концентрации элемента от его относительной интенсивности.

Программа позволяет в полной мере реализовать такие преимущества ПЗС-линеек над ФЭУ, как выбор неограниченного числа спектральных линий, охват полного диапазона измерений без разрывов и коррекция темнового тока на приемнике излучения.

Программа также рассчитывает относительную среднеквадратическую погрешность единичного измерения $Sr, \%$ в каждой серии из n измерений для каждого анализируемого элемента. Сравнив значение $Sr, \%$ с величиной вычисленной допускаемой относительной среднеквадратической погрешности единичного измерения $\sigma_{доп.}, \%$ по требованиям ГОСТ 18 895-97 [4] возможно оценить, удовлетворительна ли сходимость результатов измерений (Табл. 2):

$$\sigma_{доп.} = \frac{d_{сх.}}{2,77 \times c_{атт.}} \times 100\%, \quad (1)$$

где $d_{сх.}$ – сходимость результатов единичного измерения в серии из n измерений, 2,77 – константа для распределения коэффициента Стьюдента для серии из n измерений, $c_{атт.}$ – аттестованное по паспорту стандартного образца содержание в нем химического элемента.

Таблица 2

Результаты исследований сходимости измерений при анализе углеродистых и легированных сталей полученных на атомно-эмиссионном приборе «МСА-V»

Диапазон концентраций, %	Измеренные значения концентрации углерода в ГСО, %	$Sr, \%$	$\sigma_{доп.}, \%$
0,02–0,05	0,021 (1ФМ6)	10,4	12,0
0,05–0,10	0,076 (1ФМ2)	2,9	4,7
	0,080 (1ФМ5)	2,7	4,5
	0,080 (1ФМ29)	3,9	4,5
	0,097 (1ФМ28)	2,8	3,7
0,10–0,20	0,137 (1ФМ1)	2,9	3,4
	0,139 (УГ7Г)	1,8	3,4
0,20–0,50	0,213 (1ФМ3)	1,4	3,4
	0,279 (1ФМ18)	2,5	2,6
0,50–1,00	0,690 (1ФМ25)	1,3	1,6
	0,959 (1ФМ9)	0,9	1,1

Как следует из анализа данных таблицы для всех измеренных значений концентраций углерода различных образцов, полученные значения относительной среднеквадратической погрешности единичного измерения $Sr, \%$ находятся в поле допустимых ГОСТ 18 895-97 значений [4].

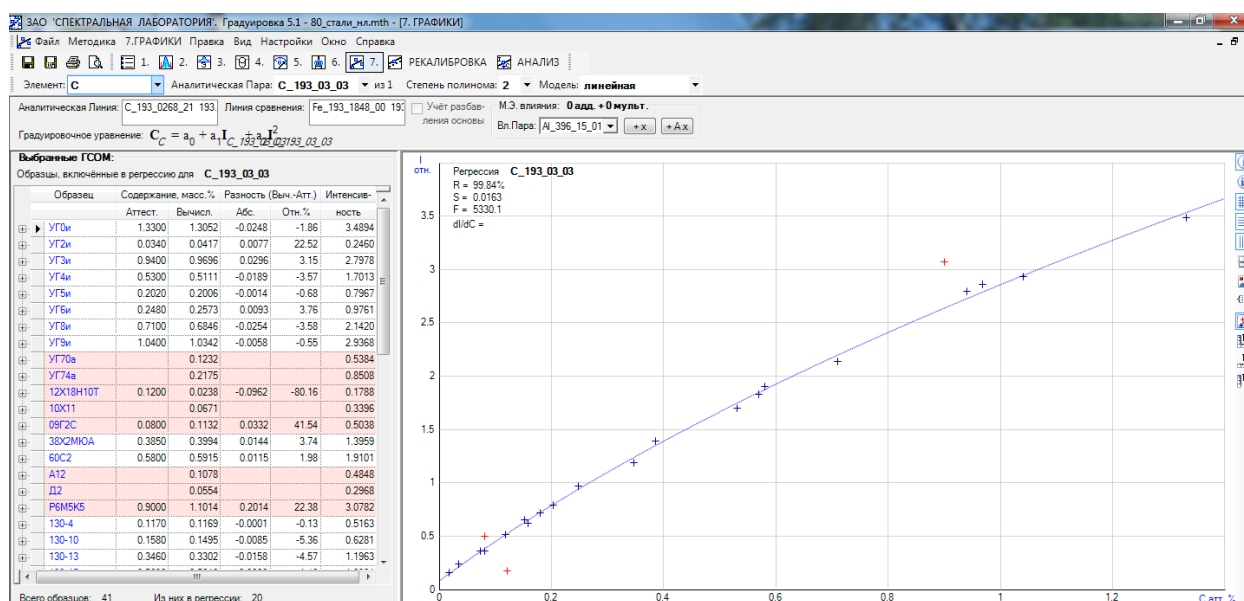


Рис. 1. Градуировочный график в программе «Grad 5»

На рис. 1 представлен градуировочный график углерода, используемый в методике анализа низколегированных сталей программы Grad 5. На нем приведена зависимость концентрации C выбранного химического элемента от интенсивности свечения I его аналитической линии. В таблице рис. 1 отражены аттестованные в паспорте ГСО и вычисленные по графику значения концентрации углерода для каждого стандартного образца, а также абсолютная и относительная погрешности между этими значениями. Как следует из сравнения с данными Табл. 2, эти значения не превышают допустимые по ГОСТ 18 895-97.

Заключение

Выполненные исследования позволили дать количественную оценку пределам обнаружения и сходимости измерений, реализуемым при измерениях концентрации различных элементов в пробах металлов на атомно-эмиссионном приборе марки «МСА-V». Полученные результаты наглядно подтверждают эффективность и целесообразность использования позиционно-чувствительных детекторов в качестве приемников излучения в промышленных АЭС-приборах, что позволит расширить аналитические возможности, улучшить метрологические характеристики и обеспечит более прогрессивные эксплуатационные качества таких приборов.

АЭС-приборы широко применяются на различных производствах для точного и быстрого анализа химического состава образцов чистых металлов и сплавов при входном и выходном контроле как непосредственно в цехах, так и в специально оборудованных лабораториях при производстве. Такие спектрометры также применяются в специализированных лабораториях как один из методов анализа для точного определения состава эталонных образцов в случаях, когда требуется проверка содержания элементов разными способами.

В результате исследования пределов обнаружения и сходимости результатов спектрального анализа на атомно-эмиссионных спектрометрах с ПЗС-линейками в качестве приемников оптического излучения определено, что позиционно-чувствительные детекторы позволяют значительно улучшить характеристики промышленных АЭС-анализаторов. Целесообразно заменить уже имеющиеся приемники излучения на уже функционирующих приборах, так как по ряду показателей они превосходят используемые фотоэлектронные умножители.

Публикации

1. *Мариуков А.А.* Преимущества атомно-эмиссионных спектрометров на базе ПЗС-линейки над приборами с фотоэлектронными умножителями // Сборник тезисов докладов конгресса молодых учёных. Вып. 2. СПб., 2014. С. 34–35.

Литература

1. *Пейсахсон И.В.* Оптика спектральных приборов. – Л., 1975. – 312 с.
2. *Зайдель А.Н.* Основы спектрального анализа. – М., 1965. – 324 с.
3. Эмиссионная фотометрия пламени и атомно-абсорбционная спектроскопия: электронное учебное пособие для студентов 2 курса [Электронный ресурс]. Казань, 2009. – 94 с. URL: <http://old.kpfu.ru/f7/docs/garifzyanov.pdf> (дата обращения: 03.07.2013).
4. ГОСТ 18895-97. Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа.



Михайлов Михаил Алексеевич
Факультет точной механики и технологии
Кафедра нанотехнологий и материаловедения
E-mail: photo.mickey@gmail.com

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ СКАНИРУЮЩИХ ЗОНДОВЫХ МИКРОСКОПОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

М.А. Михайлов

Научный руководитель – профессор В.В. Манойлов

Одним из самых важных компонентов сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) является сканер, который обеспечивает прецизионные перемещения образца. При исследовании поверхности методом постоянной высоты, сканер поддерживает постоянный зазор между зондом и поверхностью образца. С точки зрения задачи автоматического регулирования сканер является исполнительным устройством. От его характеристик во многом зависит точность измерений [1].

На сегодняшний день сканеры для СЗМ чаще всего изготавливаются из пьезокерамических движителей – поляризованной керамики, обладающей пьезоэлектрическими свойствами. Для пьезокерамики характерны такие параметры как ползучесть (большая постоянная времени установления механического положения в зависимости от приложенного напряжения), гистерезис (различный вид траектории прямого и обратного пути циклической зависимости механического положения от приложенного электрического напряжения), собственный механический резонанс. Эти свойства искажают реакцию пьезокерамики на входной сигнал и усложняют процесс измерений. Например, при большом поле сканирования ошибка накапливается и изображение горизонтальной поверхности сильно искажается [2]. Избежать этого возможно в двух случаях:

- улучшив параметры сканера, что резко увеличивает его стоимость;
- создав систему автоматического регулирования перемещения сканера.

Используя второй вариант можно получить более дешевую конструкцию СЗМ и улучшить параметры измерений.

Цели и задачи проекта

В рамках выполнения исследовательской работы разрабатывалась конструкция системы автоматического регулирования перемещения сканера. Нелинейности пьезокерамического сканера (крип, гистерезис и другие) создают искажения в получаемых изображениях исследуемой поверхности, которые традиционно исправляются постобработкой изображений. Однако при применении программной постобработки, возможна потеря информации об особенностях топологии изучаемой поверхности. Применение системы, корректирующей перемещения сканера во время измерений, позволит получать более достоверную информацию. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- разработать структуру системы автоматического регулирования перемещения сканера;
- выбрать физический принцип действия датчика измерения перемещений;
- выбрать методологию измерения перемещений для этого датчика;
- разработать конструкцию датчика;

- разработать электрические и монтажные схемы вычислительного блока;
- разработать программное обеспечение, используя результаты работ [3];
- выполнить математическое моделирование системы автоматического регулирования с объектом управления – сканер;
- подобрать коэффициенты алгоритмов цифровой обработки сигналов, используя методологию, предложенную в рамках магистерской работы [3];
- провести эксперименты на СЗМ «NanoEducator», компании «НТ-СПб»;
- выполнить корректировку алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Таким образом, целью исследовательского проекта является создание законченного программно-аппаратного комплекса для внедрения его в СЗМ «NanoEducator» с целью улучшения его метрологических характеристик.

Существующие аналоги подобных систем (например, контроллер E-509, компании PI [3]) не подходят из-за оригинальной конструкции пьезокерамического сканера СЗМ компании «НТ-СПб» [4].

Общее устройство системы корректировки перемещений сканера СЗМ

Для решения данной задачи было разработано устройство, компенсирующее погрешности и нелинейности, возникающие при перемещении сканера, путем измерения реальной величины перемещения, вычисления ошибки, обработки ее с помощью пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора и корректировки перемещений сканера. [5] [6] Структурная схема устройства представлена на рис. 1. Для измерения перемещения был выбран емкостной плоскопараллельный датчик [7], разработано и изготовлено микропроцессорное устройство, состоящее из процессора STM32F104 с ядром ARM Cortex M4 и интегральными измерителями емкости AD7745 [8].

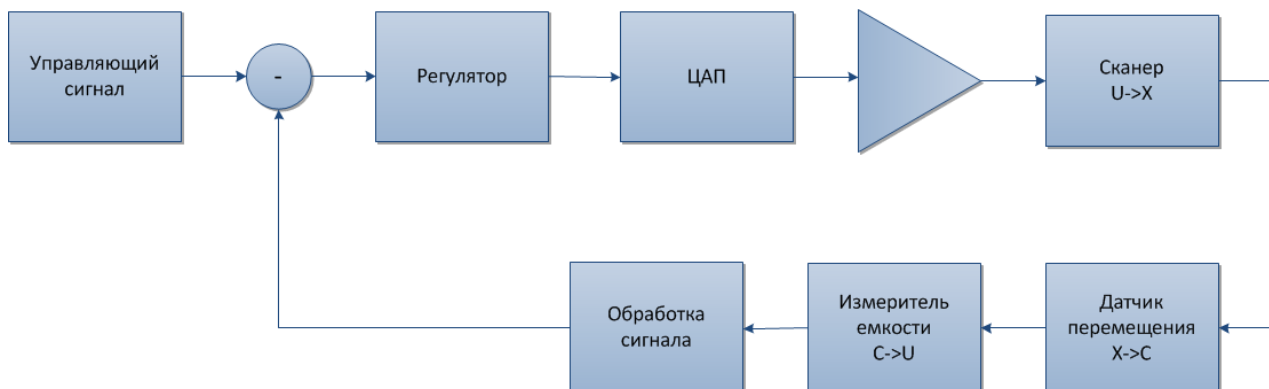


Рис. 1. Структурная схема системы корректировки перемещения сканера

Устройство разработанного емкостного датчика перемещения для пьезосканера СЗМ «Nano Educator» (рис. 2, 3) представлено на рис. 4–6 [4].

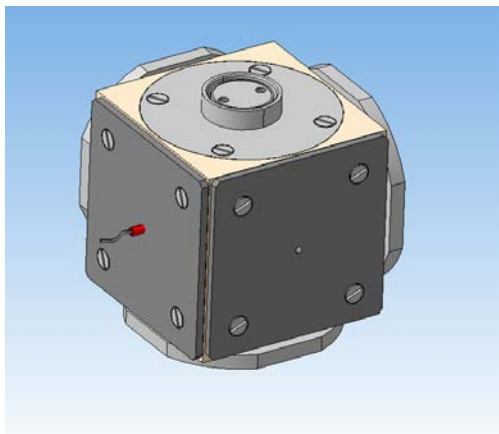


Рис. 2. Пьезосканер в сборе

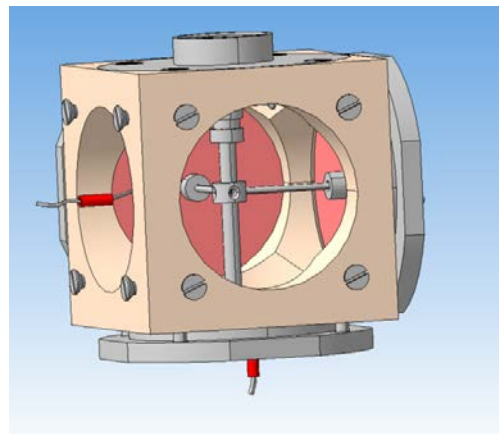


Рис. 3. Пьезосканер со снятыми фланцами

На рис. 4 изображена конструкция датчика, которая состоит из корпуса 1, клеевого соединения 2, неподвижного контакта емкости 3, диэлектрической шайбы 4 и пластиковой колодки контактов 5.

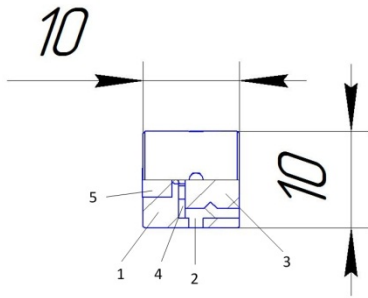


Рис. 4. Чертеж неподвижной части датчика

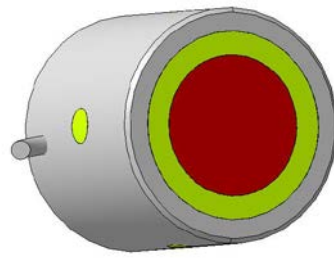


Рис. 5. Модель датчика, вид № 1

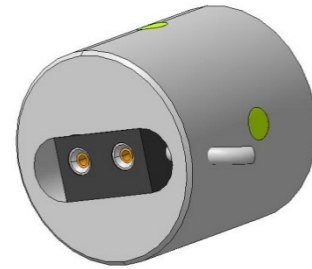


Рис. 6. Модель датчика, вид № 2

На подвижной части сканера закреплена вторая обкладка емкости, которая подключается к корпусу конструкции. Внешний вид датчика представлен на рис. 5 и 6.

Схема измерения емкости датчика

В работе [7] были рассмотрены виды датчиков перемещения. Исходя из требований к точности и дешевизне их изготовления, для сканера СЗМ был выбран емкостной датчик перемещения.

В работах [9–13] показано, что оптимальный метод измерения емкости для емкостных датчиков перемещения основывается на сравнении и анализе периодического опорного возбуждающего сигнала и сигнала, искаженного измеряемой емкостью. В качестве элементной базы был выбран интегральный измеритель емкости от компании Analog Device.

Для измерения значения емкости датчика перемещения использован интегральный измеритель AD7745. Алгоритм его работы заключается в подаче опорного сигнала (типа меандр с частотой 32 КГц) на измеряемую емкость, фиксации искаженного сигнала и последующей обработке разностного сигнала, который оцифровывается при помощи 24-битного сигма-дельта АЦП. Производитель заявляет, что AD7745 измеряет емкость в диапазоне 21 пФ с точностью 154 фФ [8].

Тестирование и калибровка измерительной системы

Для проверки системы измерения емкости был проведен эксперимент: переменная емкость измерялась при помощи системы измерения емкости и при помощи поверенного прибора «Instek LSR-7810» по всему диапазону микросхемы AD7745 (7–15 пФ) (Таблица) [8]. Результаты были аппроксимированы полиномом первой степени (рис. 7). Была получена экспериментальная функция перевода оцифрованного разностного сигнала в соответствующее ему значение емкости.

Таблица

Результаты тестирования измерительной системы

	1	2	3	4	5	6	7
Бит	808608	3638608	5888608	9878608	11768608	13948608	15658608
пФ	8,1075	9,77	10,77	12,75	13,929	15,4	15,7

Далее был проведен эксперимент, в котором перемещение сканера измерялось с помощью разработанного емкостного датчика. При малых значениях приложенного к сканеру напряжения (в зоне его линейности) одному Вольту эквивалентно перемещение сканера примерно в 3 мкм. В эксперименте на сканер подавалось постоянное напряжение в диапазоне от 0 до 250 В с шагом 10 В. Усреднение проводилось по пяти измерениям

в каждой точке. Для повышения стабильности измерений использовалось питание от аккумулятора, объединение земляной линии измерительной схемы и заземления датчика, экранирование сигнальных проводов, а также металлический экранирующий корпус на печатной плате, где размещена система измерения.

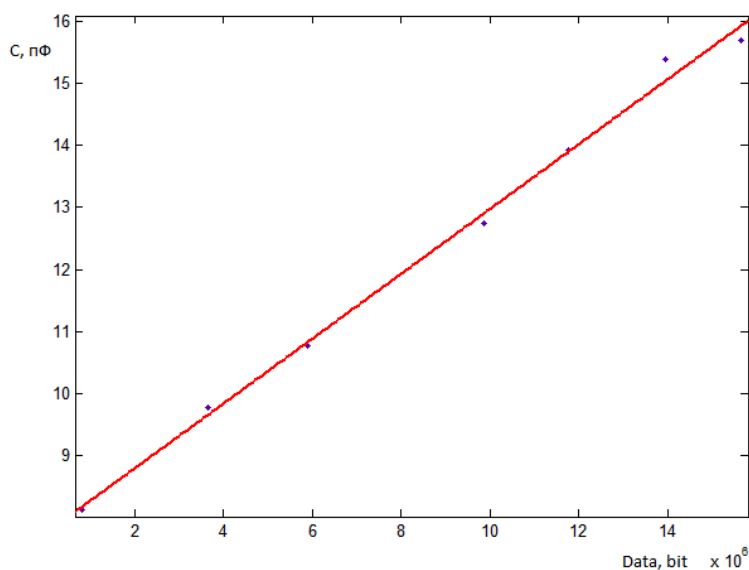


Рис. 7. Аппроксимированные результаты эксперимента

$$C = \frac{data}{1908397} + 7.737 \quad (1)$$

В ходе тестирования системы была получена стабильность сигнала в 1 фФ, при диапазоне измерения 7–15 пФ. Результаты эксперимента приведены на рис. 8. Они иллюстрируют нелинейность поведения пьезокерамического сканера.

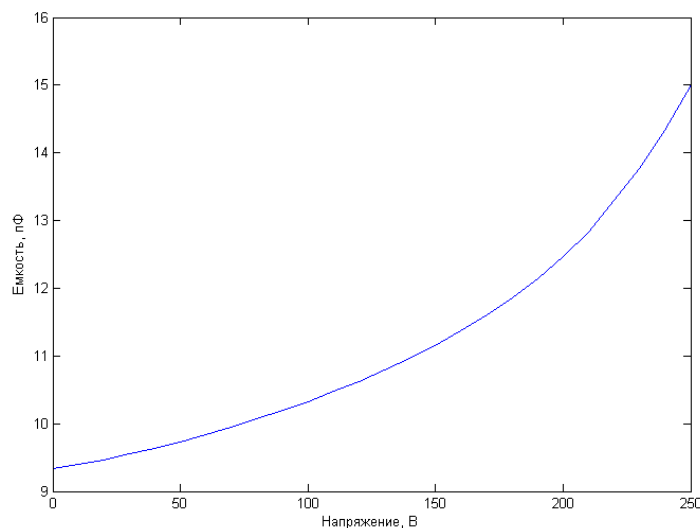


Рис. 8. Результаты эксперимента. Измеренная емкость датчика в зависимости от приложенного к сканеру напряжения

Заключение

Полученные экспериментальные данные совпали с теоретическими представлениями о поведении пьезокерамического сканера. Полученная точность измерения и стабильность сигнала позволяют измерять перемещения сканера в его рабочем режиме. Таким образом, сконструированный емкостной датчик перемещения и предложенный алгоритм измерения возможно использовать в системах автоматического регулирования перемещения сканера.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

Анализ результатов

Рассмотренный подход к автоматической регулировке перемещений сканера позволяет увеличить точность получаемых данных о топологии поверхности исследуемого образца без изменения скорости сканирования за счет устранения погрешностей пьезокерамического сканера. Данный метод является перспективным направлением развития сканирующей зондовой микроскопии. Применение более совершенной системы автоматического регулирования, корректирующей перемещения сканера во время измерений, позволяет получать более достоверную информацию.

Предложенный программно-аппаратный комплекс расширяет возможности существующего СЗМ «NanoEducator». На основании полученных результатов возможно создание нового класса измерительных приборов. Подобные алгоритмы можно использовать в СЗМ с различной природой взаимодействия между зондом и поверхностью образца.

Разработка новых материалов и нано структур неразрывно связана с развитием приборно-технической базы в этой области. Предъявляются новые требования к используемому экспериментальному оборудованию. Сканирующая зондовая микроскопия является доминирующим инструментом в изучении поверхности материалов и их свойств с высоким пространственным разрешением. Модификация и автоматизация инструментальной исследовательской базы – одно из приоритетных направлений развития приборостроения в сфере нанотехнологий.

Публикации

1. Маноилов В.В., Михайлов М.А. Оценка параметров цифрового управления в зондовом микроскопе «Nano Educator» на основе физико-математической модели // Научное приборостроение. 2012. Т. 22. № 2. С. 98–104.
2. Михайлов М.А. Система автоматического регулирования сканера в составе сканирующего зондового микроскопа // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 184–185.
3. Михайлов М.А., Маноилов В.В. Обзор методов измерения малых перемещений в приложении системы автоматического регулирования сканеров СЗМ // Научное приборостроение. 2013. Т. 23. № 2. С. 27–37.

Литература

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород, 2004. – 114 с.
2. Быков В.А., Васильев В.Н., Голубок А.О. Учебно-исследовательская мини-лаборатория по нанотехнологии на базе сканирующего зондового микроскопа «НАНОЭДЬЮКАТОР» // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 5–6.
3. PZ 77E User Manual. E-509 Position Servo-Control Module. Release 2.8.4. 2009. – 39 p.
4. Патент на изобретение РФ 2297078 «Позиционер трехкоординатный», опубл. 10.04.2007.
5. Михайлов М.А. Система автоматического регулирования сканера в составе сканирующего зондового микроскопа // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 184–185.
6. Маноилов В.В., Михайлов М.А. Оценка параметров цифрового управления в зондовом микроскопе «Nano Educator» на основе физико-математической модели // Научное приборостроение. 2012. Т. 22. № 2. С. 98–104.
7. Михайлов М.А., Маноилов В.В. Обзор методов измерения малых перемещений в приложении системы автоматического регулирования сканеров СЗМ // Научное приборостроение. 2013. Т. 23. № 2. С. 27–37.
8. AD7745/AD7746: 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor Rev.0. 2005. – 28 p.

9. Балковой А.П., Тяпкин М.Г. Емкостный датчик положения планарного электропривода // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 5 (81). С. 65–70.
10. Люкшионков Р.Г., Моисеев Н.В. Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 4 (74). С. 69–73.
11. Патент на изобретение РФ 2472106 «Емкостной датчик для измерения линейных перемещений», опубл. 10.01.2013.
12. Мецераков А.В., Мецераков В.В. Системы позиционирования СЗМ для измерений структуры и свойств наноматериалов // Датчики и системы. 2010. № 3. С. 46–48.
13. Patent US 4893071 «Capacitively incremental position measurement and motion control», publication date 09.01.1990.



Носова Марьяна Дмитриевна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра компьютерной фотоники и видеoinформатики
E-mail: nosova.md1703@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНИЙ ИНВЕРСИИ ФАЗЫ СВЕТОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

М.Д. Носова

Научный руководитель – доцент А.Н. Иванов

Цели работы – исследование возможностей повышения точности и расширения области применения оптических методов для измерения малых угловых или линейных перемещений объектов благодаря выделению линий инверсии фазы интерференционной или дифракционной картины.

В качестве световой марки предлагается использовать линии инверсии фазы интерференционных или дифракционных картин, положение которых совпадает с положением их минимумов. Наведение на линию инверсии фазы с очень высокой точностью может быть выполнено с помощью щелевой апертуры, так как распределение интенсивности в дифракционной картине Френеля за ней зависит от расстояния между центром щели и линией инверсии.

В работе [3] была предложена схема устройства для проведения угловых измерений, использующая для формирования измерительного сигнала совмещение линии инверсии фазы светового поля (рис. 1) со щелевой апертурой. Исследования показали, что по распределению интенсивности в дифракционной картине Френеля за щелевой апертурой можно с погрешностью до 0,1 мкм определить расстояние между центром щелевой апертуры и линией инверсии. К сожалению, предложенный способ имеет слишком малый диапазон измерений (менее чем 40°), а измерение интенсивности сигнала затруднено из-за низкой освещенности фотоприемника.

В ходе работы было предложено развернуть щелевую апертуру так, чтобы ее центр пересекал линии инверсии фазы нескольких порядков (рис. 2а). Если точка инверсии совпадает с центром щели, то фаза сигнала за щелью меняется на π . В результате максимумы в дифракционной картине от щели заменяются минимумами. Так как щель пересекает

минимумы разных порядков, в дифракционной картине от щели появляются дополнительные полосы, перпендикулярные краям щели (рис. 2б).

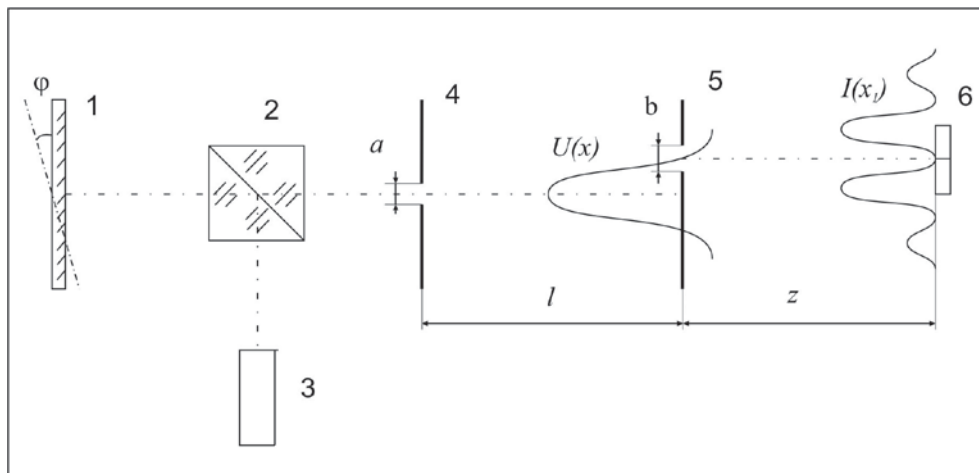


Рис. 1. Дифракционный измеритель угловых перемещений: 1 – отражатель; 2 – светоделитель; 3 – лазер; 4 и 5 – щелевые апертуры; 6 – секторный фотодиод

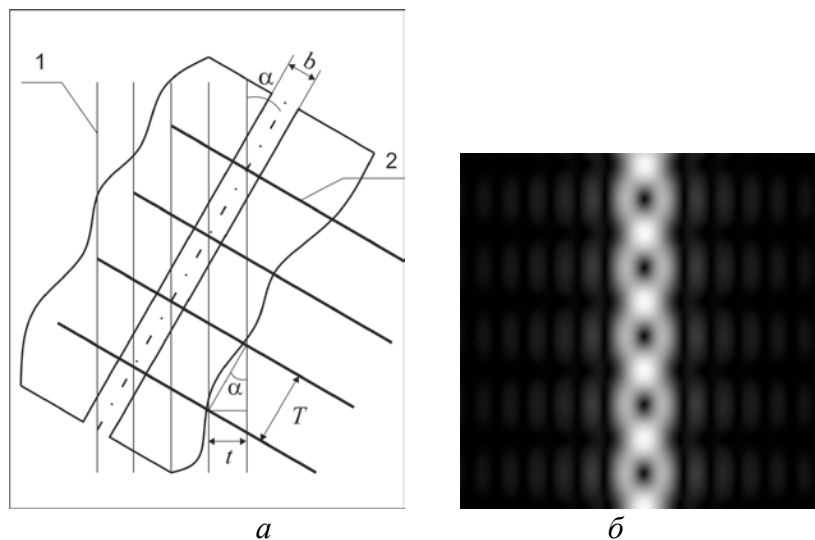


Рис. 2. а – формирование поперечных полос за развернутой щелью при выделении линий инверсии: 1 – минимумы интерференционной картины, 2 – минимумы вторичной картины; б – результат численного моделирования вторичной картины при $\alpha = 1^\circ$

Рассмотрим распределение сигнала за щелью на расстоянии $z > kb^2/2$, где k – волновое число, b – ширина щели. В плоскости щели формируется интерференционная картина, распределение амплитуды в которой описывается выражением:

$$U(x) = U_0 \cos(k\theta x) = U_0(e^{ik\theta x} + e^{-ik\theta x})/2, \tag{1}$$

где q – угол падения световой волны на щель.

Распределение амплитуды на расстоянии z за щелью может быть определено из выражения:

$$U(x_1) = A \int T(x) U(x) e^{ik(x-x_1)^2/2z} dx, \tag{2}$$

где $T(x)$ – функция пропускания щели, $A = \sqrt{k/2\pi iz} e^{ikz}$.

При развороте щели ее центр смещается на расстояние $\Delta(y) = y \sin(\alpha)$, тогда выражение (2) принимает вид:

$$U(x_1, y_1) = A \int T(x + \Delta(y_1)) U(x) e^{ik(x-x_1)^2/2z} dx, \quad (3)$$

где $y = y_1$.

Учитывая, что $z > kb^2/2$, из выражения (3) получаем:

$$U(x_1, y_1) = U_0 AB (e^{ik\theta\Delta(y)} \text{sinc}(kb((x_1 - \Delta(y))/z) - \theta)/2) + e^{-ik\theta\Delta(y)} \text{sinc}(kb((x_1 - \Delta(y))/z) + \theta)/2), \quad (4)$$

где $B = e^{ikx_1^2/2z} e^{ik\Delta(y)^2/2z}$.

Переходя к интенсивности, получаем следующее выражение:

$$I(x_1, y_1) = U_0^2 A^2 (\text{sinc}(kb((x_1 - \Delta(y))/z) - \theta)/2)^2 + \text{sinc}(kb((x_1 - \Delta(y))/z) + \theta)/2)^2 + 2 \text{sinc}(kb((x_1 - \Delta(y))/z) - \theta)/2 \text{sinc}(kb((x_1 - \Delta(y))/z) + \theta)/2 \cos(k\theta\Delta(y)). \quad (5)$$

Множитель $I(y_1) = \cos(2k\theta\Delta(y))$ описывает изменение интенсивности сигнала в плоскости регистрации по оси y , а расстояние между максимумами этого распределения вычисляется следующим образом:

$$T = \lambda / (2\theta \sin(\alpha)). \quad (6)$$

Полученное выражение (6) позволяет говорить о том, что за щелью формируется вторичная интерференционная картина, период полос которой связан с периодом полос первичной интерференционной картины $t = \lambda / 2\theta$ как $T = t / \sin(\alpha)$. Так как отношение $\Gamma = 1 / \sin(\alpha)$ при малых α достаточно велико, то малому смещению Δt будет соответствовать большое смещение ΔT .

Похожий результат получается, если распределение амплитуды в плоскости развернутой щели описывается формулой:

$$U(x) = U_0 \text{sinc}(kax/2l), \quad (7)$$

где a – ширина первичной щели, формирующей дифракционную картину в плоскости развернутой относительно нее вторичной щели, l – расстояние между ними (рис. 1). Так как в этом случае возникают трудности со взятием интеграла в выражении (3), согласно работе [1] можно разложить функцию $U(x)$ в ряд Тейлора и взять его первые два члена в окрестности центра щели. Тогда решением (3) будет следующее выражение:

$$U(x_1, y_1) \approx U_0 A^2 \text{sinc}(ka\Delta(y_1)/2l) \text{sinc}(kb(x_1 - \Delta(y_1))/z). \quad (8)$$

Его анализ показывает, что в плоскости регистрации по оси y изменение сигнала описывается выражением $U(y_1) = \text{sinc}(ka\Delta(y_1)/2l)$ с периодом в $\Gamma = 1 / \sin(\alpha)$ больше, чем у первичной дифракционной картины.

Для проверки возможностей использования линий инверсии фазы интерференционной картины для выполнения угловых измерений был собран макет установки, изображенный на рис. 3а. Он состоит из лазерного источника типа КЛМ-532 1, формирователя пучка 2, бипризмы Френеля 3 ($\sigma = 16'$ и $n = 1,53$), поворотной плоскопараллельной пластины 4 ($d = 20,2$ мм и $n = 1,53$), развернутой щели 5 ($b = 0,05$ мм) и ПЗС-приемника 6 (640×480, размер пиксела 12,4 мкм). На рис. 3б изображен макет установки для исследования возможностей применения линий инверсии фазы дифракционной картины, где бипризма заменена щелью 3 шириной $a = 0,4$ мм, находящейся на расстоянии $l = 350$ мм от второй щели.

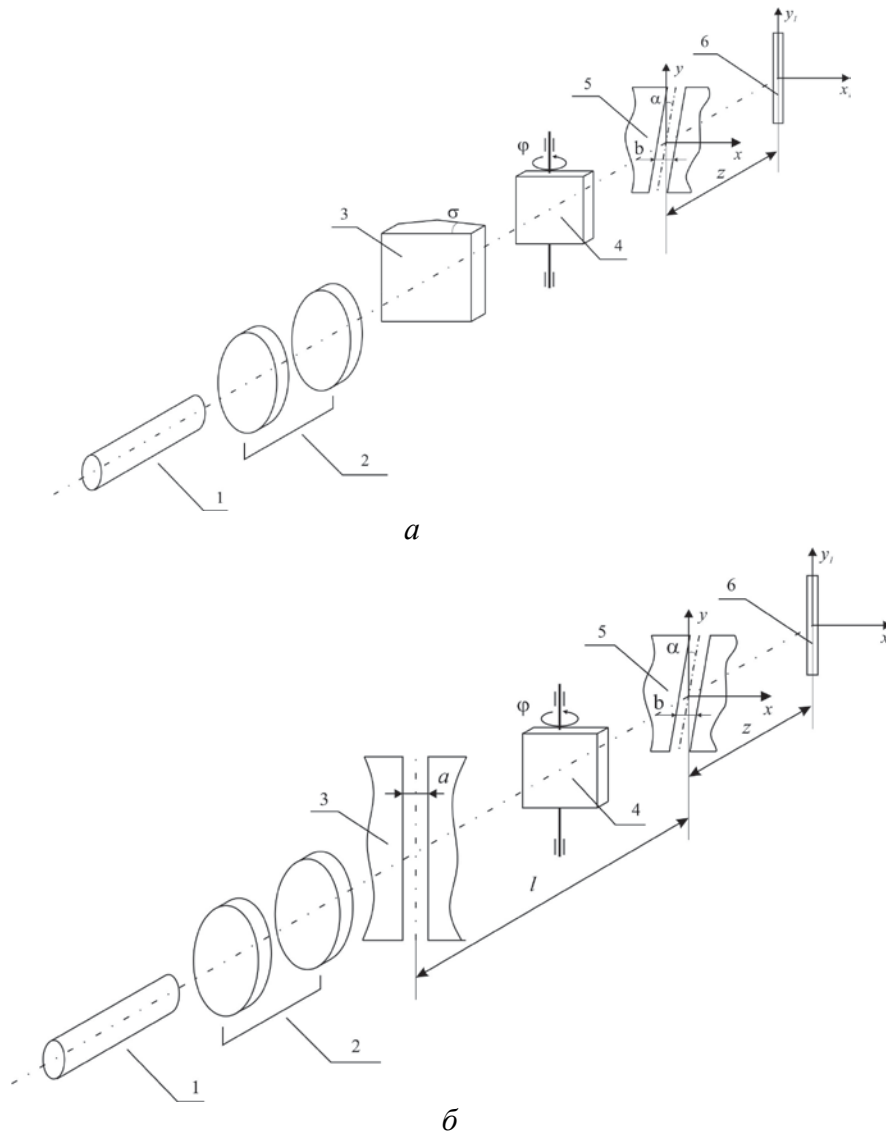


Рис. 3. Схема контроля угла поворота пластины: а – по смещению интерференционной картины; б – дифракционной картины

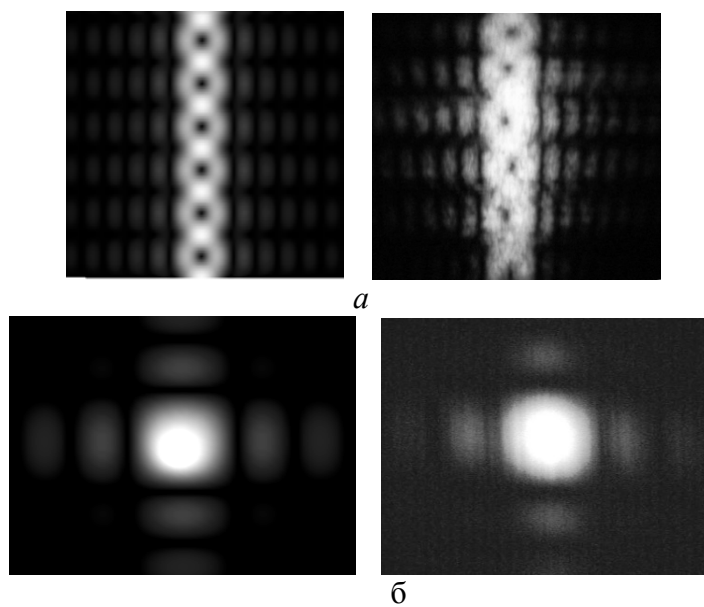


Рис. 4. Результат численного моделирования (слева) и эксперимента (справа) при выделении щелью линий инверсии фазы: а – интерференционной картины; б – дифракционной картины

При повороте пластины 4 интерференционная или дифракционная картина в плоскости щели смещается на расстояние $\Delta t \approx (n_{nl} - 1) d \varphi / n_{nl}$, где d – толщина пластины, n – показатель преломления ее материала.

Так как угол разворота щели можно задать как $\sin(\alpha) = t/T$, то выражение, связывающее угол поворота пластины со смещением вторичных интерференционных полос за щелью будет иметь вид:

$$\varphi = \frac{\Delta T n_{nl} t}{(n_{nl} - 1) d T},$$

где t – период полос интерференционной или дифракционной картины.

При использовании бипризмы $t = \lambda / 2 \sigma (n - 1)$, где σ – угол бипризмы, n – показатель преломления ее материала; при использовании щели $t = \lambda l / a$, где l – расстояние между щелями, a – ширина первой из них.

Поворот пластины обеспечивается с помощью механизма с ценой деления 5'. Регистрация изображений выполняется в области главного максимума. Полученное сечение изображения обрабатывается с помощью низкочастотного фильтра, а его экстремумы выделяются методом наименьших квадратов.

Сравнение распределений интенсивности в плоскости регистрации, полученных экспериментально и в результате численного моделирования показало хорошее соответствие (рис. 4а и 4б).

Для схемы, изображенной на рис. 4а, угол поворота пластины оценивался по смещению вторичных интерференционных полос (рис. 5). Для угла поворота пластинки в 30' погрешность составила 40". Эта погрешность определяется в основном погрешностью механизма поворота пластины, которая для угла поворота столика в 30' равна 30", а также ошибками измерения углов бипризмы, показателя преломления и т.д. Внесение поправок в полученный результат с учетом оценки погрешностей компонентов макета позволяет говорить о возможности измерения с его помощью углов поворота пластины в пределах 30' с погрешностью не более 5".

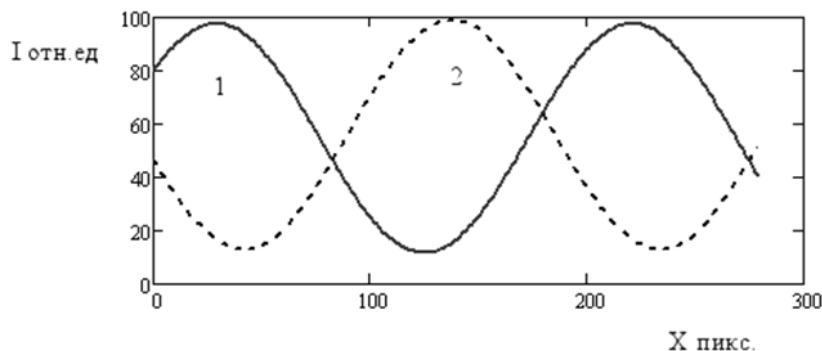


Рис. 5. Смещение вторичных полос за щелью при повороте пластины на 30'

Для схемы, изображенной на рис. 4б, угол поворота пластины оценивался по смещению главного максимума вторичной дифракционной картины (рис. 6). Для угла поворота пластинки в 30' погрешность составила 48". С учетом поправок на погрешность поворотного столика и других компонентов макета в этом случае измерения могут проводиться с погрешностью порядка 12". Увеличение погрешности связано с тем, что через две скрещенные щели проходит мало энергии и освещенность в изображении падает. Это затрудняет точное определение величины смещения максимума. Для решения этой проблемы необходим переход от регистрации точек экстремумов к регистрации точек перегиба распределения сигнала.

Чувствительность вторичных полос к развороту пластинки оказалась очень высокой – при разрешении ПЗС-приемника 0,1 пиксела она составила 0,5".

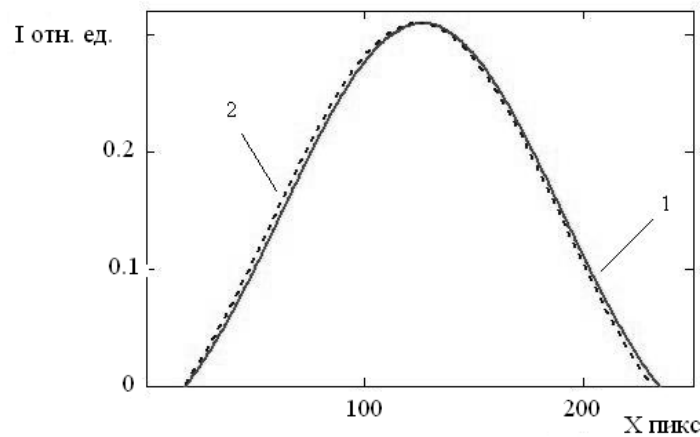


Рис. 6. Смещение главного максимума вторичной дифракционной картины при повороте пластины на $3'$

Проведенные экспериментальные исследования и численное моделирование показывают практическую осуществимость углоизмерительного устройства, в основе которого лежит использование точек инверсии фазы светового поля. На рис. 7 приведена одна из возможных схем интерференционного автоколлиматора. Ее точностной расчет показывает возможность проведения угловых измерений в диапазоне до $\pm 1^\circ$ с погрешностью около $\pm 1''$.

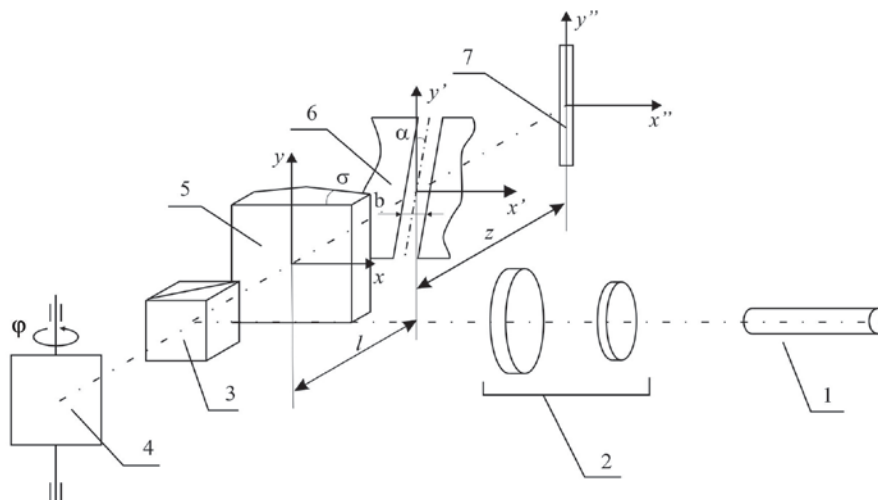


Рис. 7. Схема реализации интерференционного измерителя угловых перемещений с регистрацией точек инверсии фазы: 1 — лазер; 2 — формирователь пучка; 3 — светоделитель; 4 — отражатель; 5 — бипризма; 6 — развернутая щель; 7 — фотоприемник

Заключение

Предложен способ измерения угловых перемещений, в основе которого лежит использование линий инверсии светового поля. Численное моделирование и проведенный эксперимент показали, что они могут быть применены для создания измерителей угловых перемещений в диапазоне $\pm 1^\circ$ с погрешностью не более чем $\pm 1''$. Одна из возможных схем реализации измерителя угловых перемещений приведена на рис. 7. Недостатком предложенного способа измерения являются большие энергетические потери, возникающие при прохождении лазерного излучения через систему, что приводит к увеличению погрешности определения положения точек экстремумов вторичной интерференционной или дифракционной картины. Этот недостаток может быть устранен при регистрации точек перегиба дифракционной или интерференционной картин.

Публикации

1. Носова М.Д., Иванов А.Н. Интерференционные способы контроля положения объектов с использованием точек инверсии фазы оптического сигнала // Глобальный научный потенциал. 2014. № 9 (42). С. 39–43.
2. Носова М.Д., Иванов А.Н., Киреевков В.Е. Дифракционные методы контроля пространственного положения объектов // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 11. С. 78–82.
3. Nosova M.D., Ivanov A.N. Use of phase inversion points of the light field for angular displacement measurement // Shaping the future by engineering: 58th IWK IImenau Scientific Colloquium. Technische Universität IImenau, 08–12 September 2014. Proceedings. 2014. URN (Paper): urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk-032:7, (дата обращения 10.11.2014).
4. Носова М.Д., Иванов А.Н. Использование точек инверсии фазы интерференционной картины для увеличения точности и чувствительности угловых измерений // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 8 (15). Ч. 2. С. 27–29.
5. Носова М.Д., Иванов А.Н. Применение линий инверсии фазы интерференционной картины для контроля угловых перемещений // Сборник трудов VIII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2013». СПб, 2013. С. 213–215.
6. Носова М.Д. Исследование преобразования светового поля в двухкаскадной схеме для измерения углового положения объекта дифракционным способом // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб, 2014. С. 35–36.
7. Носова М.Д. Использование точек инверсии фазы оптического сигнала для контроля угловых перемещений объекта // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб, 2013. С. 52–53.
8. Носова М.Д., Иванов А.Н. Использование двойной дифракции для контроля угловых перемещений // Труды X Международной конференции «Прикладная оптика – 2012». Т. 1. СПб, 2012. С. 172–175.
9. Носова М.Д. Разработка и исследование дифракционных методов контроля угловых перемещений объектов // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров НИУ ИТМО. СПб, 2012. С. 229–232.

Литература

1. Королев А.Н., Гарцуев А.И., Полищук Г.С., Трегуб В.П. Цифровой автоколлиматор // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 42–47.
2. Ge Z., Takeda M. A high precision 2D-angle measurement interferometer // Proceedings of SPIE. 2002. Vol. 4778. P. 277–287.
3. Назаров В.Н., Линьков А.Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 2. С. 76–81.



Павленко Никита Андреевич
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: nikkfiz@mail.ru

ЛАБОРАТОРНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОТРАБОТКИ ПРИНЦИПОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.А. Павленко

Научный руководитель – старший научный сотрудник А.Н. Чертов

В наше время использование различного рода автоматизированных систем разделения является неременным условием повышения эффективности предприятия, деятельность которого так или иначе связана с сортировкой объектов. Но существующие традиционные методы и технологии не всегда способны обеспечить требуемое качество сортировки, что в свою очередь актуализирует поиск и внедрение новых, более эффективных, методов разделения.

Одним из наиболее привлекательных – является метод оптической сортировки. Однако существующие оптические сепараторы обладают рядом недостатков, которые приводят к сложности или невозможности, прежде всего, обнаружения и оценки малых цветовых различий между компонентами сортируемого материала и, как следствие, работы со «сложным», слабоконтрастным, и прозрачным материалами. Кроме того, имеются сложности с установкой оптимальных цветовых порогов разделения при настройке оптических сепараторов, а также перенастройкой сепаратора под разные типы объектов (например, на работу с прозрачным и полупрозрачным материалом после работы с непрозрачным) [1].

Таким образом, целью исследования является создание лабораторной («настоольной») экспериментальной установки для отработки принципов сортировки различных объектов малой крупности оптическим методом.

Для изучения возможности решения указанных проблем был проведен ряд операций по созданию оптико-электронного комплекса для отработки технических решений и адаптивных алгоритмов разделения при решении задач сортировки движущихся (0,5–2 м/с) объектов крупностью 5–25 мм.

Основными частями типового оптического сепаратора являются системы: транспортировки материала, освещения, регистрации и отсечки. Система транспортировки отвечает за доставку сортируемого материала в зону анализа. От особенностей реализации системы освещения зависит эффективность определения и различения цветовых оттенков объектов. Некоторые оптические сепараторы работают только с белым светом, в других – используют освещение сложного спектрального состава. Система регистрации на основе быстродействующих цифровых камер осуществляет процесс получения изображения, а также его обработку и анализ в соответствии с заданным алгоритмом.

По результатам анализа совокупности селективных (разделительных) признаков сортируемых объектов принимается решение о выделении полезных компонентов из потока исходного материала, реализуемое системой отсечки.

После оценки возможных схем построения, компоновки элементов разрабатываемой установки и требуемой элементной базы были выбраны два возможных варианта ее реализации (рис. 1).

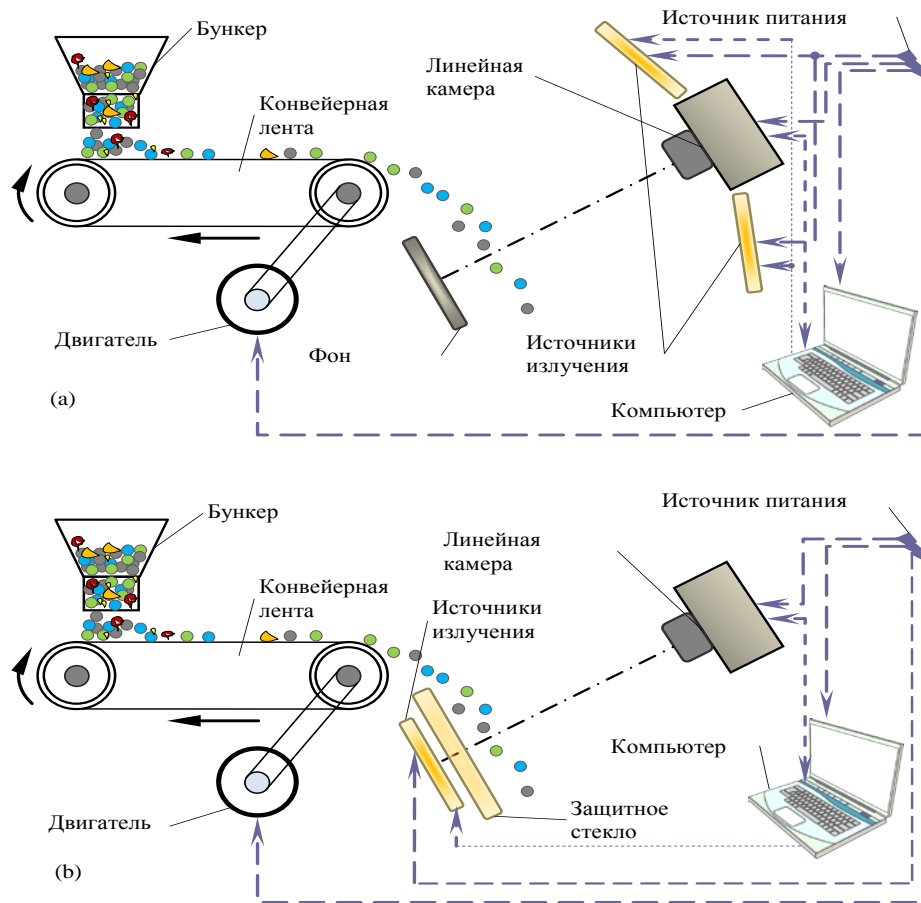


Рис. 1. Схемы построения и принцип работы оптико-электронного комплекса при разделении минеральных образцов: а – непрозрачных; б – прозрачных и полупрозрачных

В качестве подающего элемента установки используется транспортная лента, что позволяет обеспечить стабильную траекторию движения объектов анализа и плавную регулировку скорости подачи. Ширина транспортной ленты – 150 мм, длина рабочего участка – 300 мм.

Выбор в пользу светодиодных источников света позволяет реализовать не только управление яркостью, но и цветом подсветки. Такой подход позволит увеличить селективность (избирательность) цветового анализа и эффективность всего процесса разделения. Узлы освещения и регистрации выполнены единым блоком, высота и угол установки которого определяются скоростью подачи и, как следствие, траекторией движения материала. Расстояние между светодиодными источниками узла освещения регулируется в пределах 160–200 мм.

Сменный фон также является важным элементом при выборе оптимальных условий процесса сортировки и удобен на стадии настройки установки под определенный тип материала.

Используемую высокоскоростную камеру можно контролировать с учетом скорости подачи материала. Это позволит минимизировать количество кадров, необходимых для обнаружения объектов, и повысить быстродействие процесса анализа. Рабочее расстояние (от входного зрачка объектива камеры до зоны анализа) может меняться от 100 до 300 мм. Наклон источников излучения относительно оптической оси объектива также может меняться в пределах $\pm 15^\circ$, что позволяет оптимизировать условия освещения объектов анализа при изменении рабочего расстояния.

На основании представленной схемы была разработана компьютерная модель установки исследования возможностей сортировки непрозрачного материала (рис. 2).

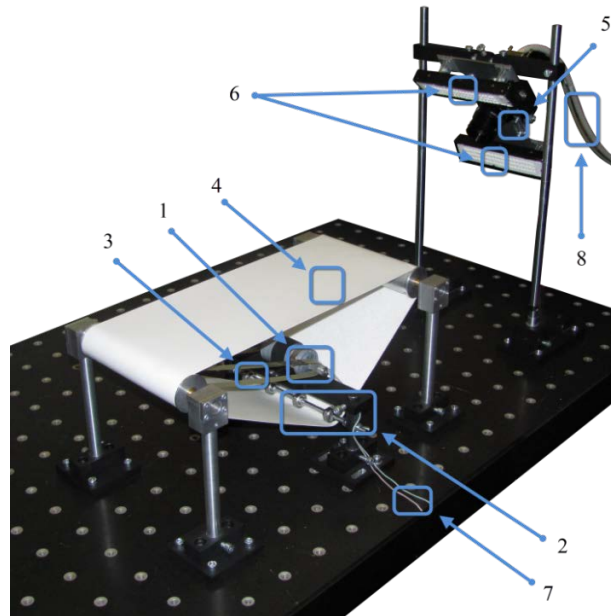


Рис. 2. Установка для цветового анализа движущихся объектов: 1 – двигатель со шкивами на концах вала; 2 – натяжение ленты; 3 – зубчатые ремни; 4 – лента; 5 – линейная камера с объективом; 6 – источники освещения; 7 – кабель к источнику питания двигателя; 8 – кабель к блокам питания камеры, источников освещения и устройству обработки и управления

Модель предназначена для крепления на оптическом столе. Модульный принцип построения позволяет менять взаимное расположение ее ключевых узлов и таким образом адаптировать систему под особенности исследуемого типа руды.

Используемая камера позволяет получать высококачественное цветное изображение и различать (с учетом шумовых параметров приемника оптического излучения) порядка 600 тыс. цветовых оттенков. Система освещения для непрозрачных материалов была составлена из двух протяженных источников излучения на основе 66-ти SMD-светодиодов, которые были разработаны ранее.

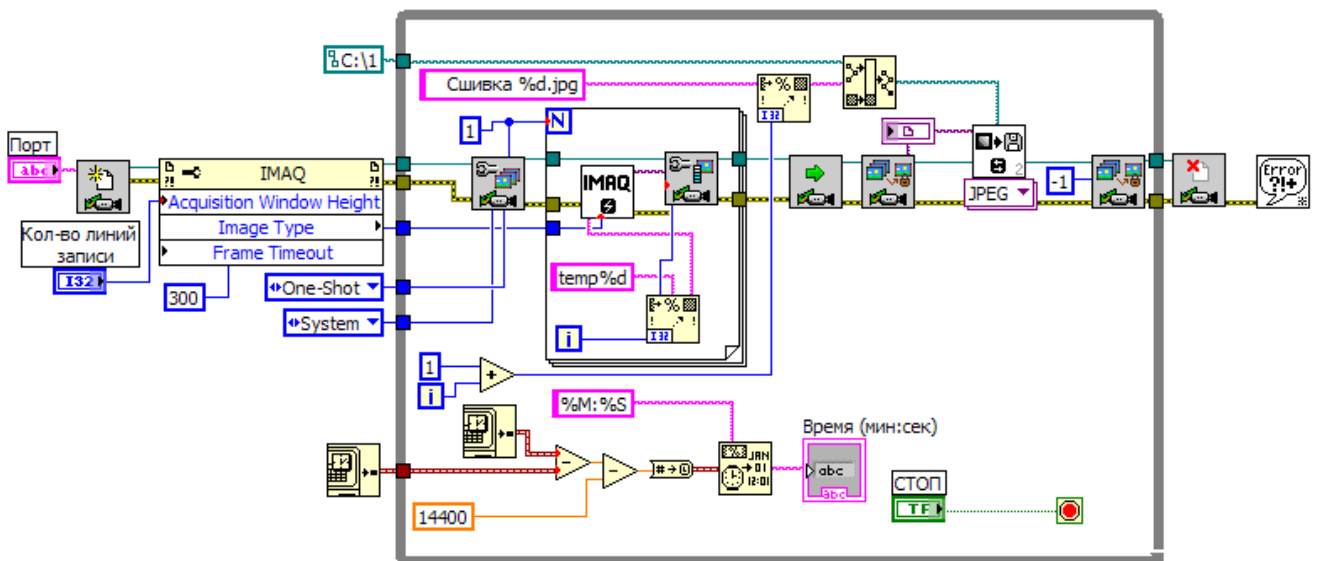


Рис. 3. Блок-диаграмма программы сканирования

Для детального исследования особенностей процесса получения и анализа изображений движущихся минеральных объектов с помощью разработанной установки создано базовое

программное обеспечение. Реализованное в среде LabVIEW, оно является удобным и гибким инструментом и позволяет:

- получить большое количество снимков зоны анализа в режиме реального времени без потери скорости работы;
- автоматизировать процесс накопления информации о регистрируемых объектах;
- визуализировать весь процесс регистрации минеральных объектов.

Проведенные экспериментальные исследования установки позволили изучить особенности процесса регистрации и выявить возможные негативные факторы, препятствующие эффективному анализу движущихся минеральных объектов.

На рис. 3 приведены примеры записи процесса схода движущихся минеральных объектов с транспортной ленты, характеризующие возможные проблемы при организации процесса их освещения и регистрации без использования каких-либо методов их устранения. Эксперимент проводился при скорости движения ленты 0,9 м/с, разрешении камеры 1024×1 пикселей и частоте съемки (рис. 4а) 10 кГц и (рис. 4б) 5 кГц. Стрелками показано направление движения минеральных объектов относительно камеры.

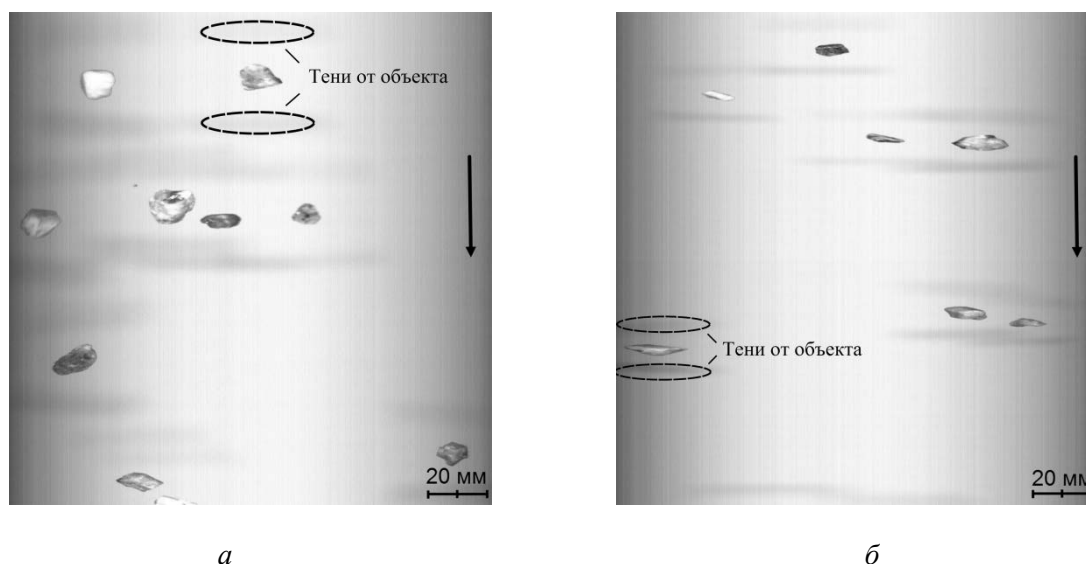


Рис. 4. Изображение минеральных объектов после схода с ленты: а – неравномерность освещения зоны анализа и образование теневых зон; б – случай линейного искажения изображения вследствие рассинхронизации режимов работы камеры и транспортной ленты

Рис. 4а иллюстрирует случай засветки центральной зоны кадра, которая является следствием неравномерного распределения света от использованных при эксперименте светодиодных источников. Кроме того, на изображении видны тени объектов от протяженных источников на фоновой пластине. Оба указанных фактора являются существенными и оказывают влияние на точность цветового анализа изображения.

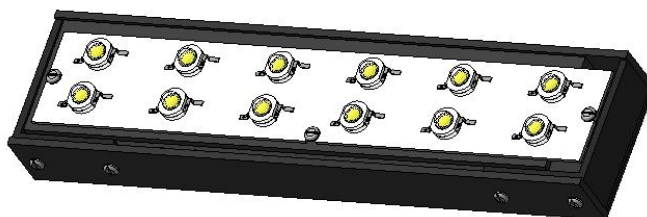


Рис. 5. Модель источника освещения

Для исключения неравномерности освещения зоны с учетом [2] был создан макет источников света. Источник состоит из шести светоизлучающих диодов «теплого» свечения

(светодиоды OS-5W WARM WHITE мощностью 5 Вт с цветовой температурой 6500 К) и шести светоизлучающих диодов «холодного» свечения (светодиоды OS-5W WHITE мощностью 5 Вт с цветовой температурой 3000 К). Дизайн корпуса позволяет оптимально рассеивать выделяющееся тепло.

Для устранения теней в качестве фона можно использовать не отражающую поверхность, а источники света, либо применять дополнительную фильтрацию на стадии предварительной обработки изображений.

На рис. 4б показано, что может случиться при неправильной синхронизации работы узлов подачи и регистрации. Линейное искажение изображения, то есть уменьшение высоты кадра, вносит ошибки в итоговые результаты анализа селективных признаков минеральных объектов и поэтому должно быть исключено на стадии подготовки к процессу сепарации.

Помимо рассмотренных факторов, существует также небольшой разброс траекторий движения минеральных объектов после схода их с транспортной ленты. Для предотвращения этого на уже имеющуюся конструкцию установили борта.

Кроме того из-за разброса некоторые из объектов не попадали в фокус объектива. Причиной указанного недостатка стало отсутствие в конструкции установки вибропитателя, обеспечивающего равномерную подачу анализируемого минерального сырья на ленту транспортера, а также направляющих бортов для исключения поперечного биения транспортной ленты. Однако влияние данного негативного фактора сводится к минимуму путем установки на высокоскоростную линейную камеру оптической системы с необходимой глубиной резкости.

Заключение

По результатам проведенных исследований оптимальный режим работы для действующей модификации установки определяется скоростью подачи материала ~ 1 м/с и частотой съемки – 10 кГц при яркости источников излучения ~ 100 лм. Увеличение скорости подачи требует соответствующего увеличения частоты съемки и яркости источников излучения для компенсации уменьшения экспозиции фоточувствительного элемента камеры.

Комплекс предназначен в первую очередь для решения исследовательских задач: изучения особенностей процесса оптической сортировки, поиска возможностей по оптимизации схем построения оптических сепараторов, апробации принципов разделения с использованием комплекса селективных оптических признаков (не только цвета, но и формы проекции, степени прозрачности, структуры поверхности и т. д.).

Тем не менее в совокупности со способом цветовой классификации [3], содержащим последовательность действий, необходимых при выполнении анализа цвета объектов, сложных по структуре и цвету поверхности, с использованием систем технического зрения, разработанная установка может рассматриваться и как прототип оптического сепаратора минеральных объектов малых классов крупности, в том числе менее 5 мм.

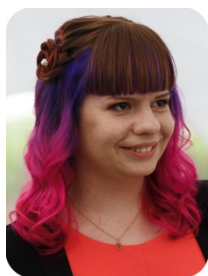
Публикации

1. Павленко Н.А. Исследование и разработка установки для цветового анализа движущихся объектов // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров НИУ ИТМО. СПб., 2013. С. 56–60.
2. Павленко Н.А., Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Модель оптического сепаратора руд твердых полезных ископаемых // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 7. С. 75–76.
3. Павленко Н.А. Узел регистрации для установки цветового анализа движущихся объектов на базе высокоскоростной камеры // Альманах научных работ молодых ученых. СПб., 2013. С. 235–237.
4. Pavlenko N.A., Chertov A.N., Gorbunova E.V., Korotaev V.V. Optoelectronic complex for separation of moving small size mineral objects // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9141. P. 914127.

5. Петухова Д.Б., Павленко Н.А. Возможности оптического метода обогащения минерального сырья // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 7. С. 91–93.

Литература

1. Алехин А. А., Горбунова Е.В., Коротаев В.В., Ольховский А.М., Петухова Д.Б., Чертов А.Н. Оптико-электронная система экспресс-анализа руд твердых полезных ископаемых оптическим методом // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 11. С. 15–21.
2. Chertov A., Gorbunova E., Korotaev V., Serikova M., Peretyagin V. Simulation of the multicomponent radiation source with the required irradiance and color distribution on the flat illuminated surface // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8429. P. 84290D.
3. Патент на изобретение РФ 2468345 «Способ цветовой классификации объектов и оптико-электронное устройство для его реализации», опублик. 07.04.2011.



Пархимович Ольга Владимировна
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: olya.parkhimovich@gmail.com

РАЗРАБОТКА ФОРМАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ БЮДЖЕТОВ

О.В. Пархимович

Научный руководитель – доцент Д.И. Муромцев

Сегодня тема открытости государства и его региональных и муниципальных бюджетов является актуальной не только в России, но и в зарубежных странах. Во всем мире социологи, исследователи, гражданские активисты и некоммерческие организации изучают данные о бюджетах своих городов, регионов и стран, высказывают мнения о них, участвуют в обсуждениях и предлагают свои идеи по наиболее оптимальному расходованию государственных средств. В общемировой практике данное явление называется применением «партиципаторных подходов» к формированию и распределению бюджета. Оно позволяет привлечь граждан к его составлению, получить от них обратную связь, увеличить прозрачность управления государственными расходами и их эффективность.

Применение данного подхода стало возможным благодаря высокому темпу развития информационно-коммуникационных технологий и интернета, позволяющих гражданам оперативно получать данные и обмениваться информацией, а государственным органам с меньшими расходами и более эффективно предоставлять сведения о своей деятельности. С другой стороны, важным является не только факт предоставления данных, но и их формат. Можно выделить два основных аспекта, влияющих на возможность использования данных о бюджетах гражданами: во-первых, они должны быть понятны тем, кто не является специалистом в области финансов, то есть должен публиковаться так называемый «бюджет для граждан», во-вторых, данные должны быть опубликованы в машиночитаемых форматах, то есть в тех форматах, которые могут быть подвержены автоматизированной обработке и анализу (например, использованы программистами для разработки программ или загружены аналитиками в программное обеспечение для работы с данными вроде Excel).

С 2013 г., с момента подписания Россией вместе с остальными членами-участниками «Группы восьми» (G8) Хартии открытых данных, Российская Федерация позиционируется

на международной арене как современная открытая держава. В то же время Россия вошла в десятку лучших стран по индексу открытости бюджета Международного бюджетного партнерства. По словам главы Министерства финансов РФ Антона Силуанова, к 2018 г. Россия должна войти в первую пятерку стран по индексу открытости бюджета. Для этого в бюджетном послании, представленном Президентом России, озвучена цель по введению в эксплуатацию портала бюджетной системы, на котором будут размещаться систематизированные данные о формировании и исполнении всех бюджетов, а также будет опубликована брошюра «Бюджет для граждан».

Выполняя задачи, озвученные в бюджетном послании, регионы Российской Федерации активно публикуют данные о бюджетах, однако формат и качество данных не всегда позволяет их использовать. Например, бюджет Санкт-Петербурга, состоящий из более чем тысячи страниц, публикуется в формате pdf и не может быть подвергнут машинной обработке. Для его анализа заинтересованным гражданам и аналитикам необходимо потратить значительное количество свободного времени, чтобы разобраться со структурой данных, изучить необходимые кодификаторы и нормативно-правовые акты, а также сопоставить данные. То есть несмотря на публикацию информации в открытых источниках, по объективным причинам большинство граждан не может с ее помощью составить представление о направлениях расходования бюджетных средств и их целевом использовании, а также сделать выводы об эффективности расходов. На решение этой проблемы направлен данный проект.

Целью научно-исследовательской работы является разработка модели представления данных, формата открытого бюджета и алгоритма преобразования бюджетов из формата, используемого государственными органами, в разработанный формат.

В процессе работы над проектом были реализованы поставленные задачи и достигнуты планируемые результаты. Для представления данных о бюджете была создана модель данных, которая является набором онтологий. Ее преимущества – машинно-интерпретируемые формулировки основных понятий и отношений между ними, а также создание уникальных идентификаторов для каждой используемой сущности. Создание базовых онтологий для хранения данных о планируемых и фактических доходах и расходах и государственных контрактах позволяет в дальнейшем сопоставлять информацию, содержащуюся в законах о бюджетах, отчетах об исполнении бюджетов и государственных контрактах в пределах одного или нескольких субъектов Российской Федерации.

Для оценки качества опубликованных массивов данных бюджетов субъектов Российской Федерации был подготовлен метод оценки, учитывающий методические рекомендации по публикации открытых данных [1] и состоящий из нескольких критериев:

- оценка формата массива данных. Критерий включает в себя структурированность и наличие соглашения об использовании массива данных;
- оценка мета-данных массива. Критерий включает в себя наличие истории изменений массива, возможности скачивать его предыдущие версии, указание периодичности актуализации набора данных, частоту обновления массива данных, указание ответственного лица и его контактов;
- оценка доступа к массиву. Критерий включает в себя наличие постоянной рабочей ссылки, возможности скачать массив в нескольких форматах, возможность использования средств просмотра данных;
- оценка качества представленных данных. Критерий включает в себя степень заполненности массива данных, наличие в нем неструктурированной информации, отсутствие ненормализованных данных и наличие ошибок в них.

После создания модели представления данных и метода их оценки была разработана структура формата «Открытого бюджета», предназначенного для публикации российских данных о бюджетах в машиночитаемом формате. Основные используемые поля представлены в Табл. 1. Данная структура может быть применена для создания файлов

с расширениями CSV, XML, RDF, что соответствует 3–5 звездам в пятизвездочном рейтинге, используемом международным сообществом для оценки открытых данных [3].

Таблица 1

Основные поля, используемые в формате «Открытого бюджета»

Наименование поля	Тип	Описание
unic_id	string	Уникальный идентификатор, присваиваемый каждой строке в бюджете
year	date	Год, на который принят бюджет
programName	string	Название программы
programCode	number	Код программы
subprogramName	string	Название подпрограммы
subprogramCode	number	Код подпрограммы
costArticleName	string	Название целевой статьи расходов
costArticleCode	number	Код целевой статьи расходов
costTypeName	string	Название вида расходов
costTypeCode	number	Код вида расходов
costSectionName	string	Название раздела
costSectionCode	number	Код раздела
costSubsectionName	string	Название подраздела
costSubsectionCode	number	Код подраздела
adminName	string	Название распорядителя бюджетных средств
adminCode	number	Код распорядителя бюджетных средств
sum	number	Сумма, распределенная на данную строку в бюджете
currency	string	Валюта

В процессе работы над проектом был разработан алгоритм преобразования и визуализации бюджетов регионов Российской Федерации. Алгоритм может быть использован лицами без специализированной подготовки в области информационных технологий, то есть с использованием данного алгоритма любой желающий, например представитель органа государственной власти или обычный гражданин без экономического или технического образования. Полная версия разработанного алгоритма и руководства по Преобразованию бюджета в формат «Открытого бюджета» (OpenBudgetFormat) опубликована на портале «Открытого бюджета» [4].

Разработанный алгоритм был применен к бюджетам Москвы, Ленинградской области и Гатчинского муниципального района для преобразования их в машиночитаемый формат. Полученные массивы данных опубликованы в интернете и доступны по следующим ссылкам:

- бюджет Москвы на 2014 г.: <https://openspending.org/moscow2014/meta>;
- бюджет Ленинградской области на 2014 г.: <https://openspending.org/russianbudgets/meta>;
- бюджет Гатчинского муниципального района на 2014 г.: <https://openspending.org/gatchina2014/meta>.

Незначительные изменения данного алгоритма позволили также преобразовать в машиночитаемый формат и визуализировать данные консолидированных отчетов о кассовых поступлениях и выбытиях, размещенных на сайте Федерального казначейства на примере двух регионов: Санкт-Петербурга и Архангельской области, а также данные государственных контрактов Ленинградской области. Полученные массивы данных также опубликованы в интернете и доступны по ссылкам:

- данные о поступлениях и выбытиях на счета Санкт-Петербурга <https://openspending.org/postspb2013/meta>;

– данные о поступлениях и выбытиях на счета Архангельской области <https://openspending.org/arkhpost2013/meta>.

Все преобразованные массивы данных могут быть подвержены автоматизированной обработке, что позволяет их также и визуализировать. В процессе выполнения проекта были рассмотрены несколько методов визуализации. В качестве инструмента визуализации был выбран сервис OpenSpending. Наиболее подходящим методом для визуализации данных бюджета на данный момент является TreeMap (рис. 1), реализованный на указанном сервисе. Он позволяет сгруппировывать данные по разным срезам и визуализировать их пропорционально суммам, содержащимся в этих данных. Визуализация данных бюджета происходит следующим образом: открыв ссылку, например на бюджет Ленинградской области [5], визуализированный по срезу «государственных программ», пользователь видит, сколько средств запланировано на каждую программу относительно общего размера бюджета. После выбора одной из программ, пользователю открывается аналогичная визуализация, но для подпрограмм и т. д. Срезам визуализации бюджета может быть несколько, например программы и подпрограммы, распорядители бюджетных средств, субвенции, разделы и подразделы и т. д. Для каждого массива данных были подготовлены соответствующие визуализации, ссылки на которые можно найти выше.

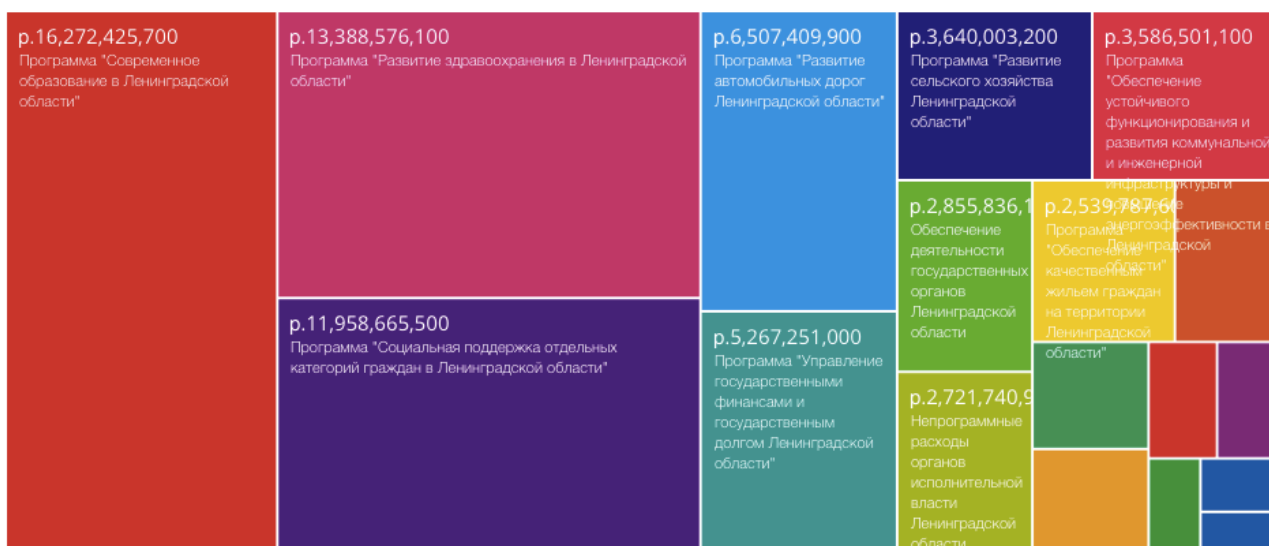


Рис. 1. Метод визуализации данных TreeMap

На основе проведенных обзоров и разработанных методов и алгоритмов были подготовлены лекции по открытым бюджетам с подробным объяснением процесса преобразования и визуализации данных и ряд руководств для пользователей, заинтересованных в изучении данных доходов и расходов субъектов Российской Федерации, но не знакомых со структурой бюджетов, инструментами преобразования и визуализации данных.

Результаты выполнения научно-исследовательского проекта были представлены на следующих конференциях:

- CityCamp & Hackathon, Санкт-Петербург, 14–16 июня 2014 г.;
- Open Knowledge Festival, Берлин, Германия, 15–17 июля 2014 г.;
- Web Intelligence Summer School 2014 «Web of Data», Saint Etienne, Франция, 25–29 августа 2014 г.;
- 16th Conference of Open Innovations Association FRUCT, 28–31 октября 2014 г.

Представление докладов на конференциях и получение обратной связи от международных экспертов в данной области подтвердило, что эта тема является на сегодняшний день актуальной, и выявило заинтересованность экспертов в данной работе.

Преобразованные в результате выполнения проекта данные о бюджетах Москвы, Ленинградской области, Гатчинского муниципального района, а также созданные на их основе визуализации, выложены в открытый доступ в интернете. Аналитикам и экономистам это позволяет их использовать для проведения социальных и научных исследований; гражданам – в удобной и понятной форме получать представление о расходах в соответствующем субъекте Российской Федерации, оценивать эффективность расходования бюджетных средств, предлагать свои идеи государственным органам, планировать семейный бюджет или рассчитывать свой вклад в бюджет региона; представителям бизнеса – использовать данные в своей профессиональной сфере для аналитической, журналистской или общественно-политической деятельности.

Публикация алгоритма преобразования бюджетов из формата, используемого государственными органами, в формат «Открытого бюджета», а также алгоритма их визуализации, позволяет представителям государственных органов, экономистам, студентам и аспирантам, а также заинтересованным гражданам применить этот метод обработки для данных других регионов, исследовать их, а также предоставить возможность их исследования иным заинтересованным лицам. За счет этого появляется дополнительный инструмент для информирования граждан о принимаемых решениях и происходит повышение их финансовой грамотности.

Разработанные алгоритмы могут быть адаптированы для преобразования других данных о расходах и доходах субъектов Российской Федерации (например данные отчетов об исполнении бюджета), что позволяет сопоставлять данные из разных источников и проверять их. Результаты проекта также позволяют осуществлять на их основе подготовку лекций и мастер-классов по работе с данными бюджетов.

Заключение

Разработанная модель представления данных о бюджете позволила создать первую версию формата «Открытого бюджета», предназначенного для публикации российских данных в соответствии с международными стандартами.

Разработанные алгоритмы и методы преобразования и визуализации данных бюджетов являются инструментом для преобразования опубликованных открытых государственных данных в машиночитаемый формат с использованием минимального количества времени. Публикация алгоритмов в открытом доступе позволяет использовать их всем желающим: от общественных деятелей и экономистов до студентов и заинтересованных граждан.

В результате выполнения проекта бюджеты различных уровней были преобразованы в машиночитаемые форматы: города федерального значения Москвы, Ленинградской области, Гатчинского муниципального района. Это доказывает, что разработанные алгоритмы являются универсальными и могут быть применены к значительному количеству опубликованных массивов данных, автоматизированным образом сопоставлены между собой или с другими данными, подготовленными по разработанному алгоритму или представленными в формате «Открытого бюджета».

На основе результатов работы, полученных в ходе исследования, были представлены доклады на конференциях, поданы публикации в рецензируемые издания, а также подготовлены лекция и руководства по работе с данными бюджетов.

Публикации

1. *Parkhimovich O., Vlasov V.* Development of the open budget format // Proceedings of the 16th Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2014. P. 60–65.
2. *Mouromtsev D., Kozlov F., Kovriguina, L., Parkhimovich O.* Combined method for E-Learning ontology population based on NLP and user activity analysis // Proceedings of the Linked Learning meets LinkedUp: Learning and Education with the Web of Data. Vol. 1254. 2014.

3. Пархимович О.В., Власов В.В., Муромцев Д.И. Разработка онтологии открытых государственных данных на примере расходов бюджета Санкт-Петербурга // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 141–146.
4. Mouromtsev D., Vlasov V., Galkin M., Knyazev V., Parkhimovich O. Development of St. Petersburg's linked open data site using Information Workbench [Electronic resource] // Proceedings of the 14th Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2013. P. 77–82. URL: http://www.fruct.org/publications/fruct14/files/Mou_10.pdf (accessed: 31.09.2014).

Литература

1. Openspending – сервис для визуализации бюджетов [Интернет-портал]. URL: <https://openspending.org> (дата обращения: 31.09.2014).
2. OpenRefine – сервис для работы с данными [Интернет-портал]. URL: <http://openrefine.org> (дата обращения: 31.09.2014).
3. Методические рекомендации по публикации открытых данных версия 3.0 [Электронный ресурс] // Открытые данные России [Интернет-портал]. URL: <http://data.gov.ru/metodicheskie-rekomendacii-po-publikacii-otkrytyh-dannyh-versiya-30> (дата обращения: 31.09.2014).
4. 5 Start Open Data Rating [Web portal]. URL: <http://5stardata.info> (accessed: 31.09.2014).
5. Преобразование бюджета в формат OpenBudgetFormat 1.0 с помощью OpenRefine [Электронный ресурс] // LenObl2014.ru – Открытый бюджет Ленинградской области 2014 [Интернет-портал]. URL: <http://files.lenobl2014.ru/docs/howto-convert-budget-openrefine.pdf> (дата обращения: 31.09.2014).
6. Бюджет Ленинградской области на 2014 г. (полная версия) [Электронный ресурс] // Openspending – сервис для визуализации бюджетов [Интернет-портал]. URL: <https://openspending.org/russianbudgets/views/tree-map-biudzhet-lo-na-2014-god-po-programmam> (дата обращения: 31.09.2014).



Перетягин Владимир Сергеевич
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: peretyagin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА С ЗАДАНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В.С. Перетягин

Научный руководитель – доцент А.Н. Чертов

В работе представлены принципы проектирования многокомпонентных светодиодных источников света с заданными параметрами излучения. Показана возможность получения необходимого распределения цвета и энергии по зоне анализа с помощью указания геометрических параметров создаваемого источника и использования реальных энергетических, спектральных и цветовых параметров, а также характеристик отдельных излучающих элементов.

На сегодняшний день разработки в области технологий освещения занимают одну из ведущих позиций в сфере инноваций. Новейшие системы освещения [1–3], в частности светодиодного, актуальны и востребованы как по причине малого энергопотребления и длительных сроков службы, что выгодно отличает их от традиционных источников света, так и благодаря широкими возможностями по созданию на их основе специализированных устройств подсветки [4-5].

Настоящая работа посвящена решению проблемы автоматизированного проектирования многокомпонентного светодиодного источника света. Общеизвестно, что форма пространственного распределения освещенности на заданном расстоянии от многокомпонентного источника излучения определяется количеством и взаимным расположением его элементов, а также функциями, описывающими оптические характеристики этих элементов [6]. Таким образом, для моделирования многокомпонентного источника излучения, включающего в себя светодиоды с различными спектрами излучения, и получения модели цветовой картины в зоне анализа используется комбинация распределений цветовых составляющих с учетом переналаживания спектров отдельных элементов. В работе также описываются результаты экспериментального проектирования различных светодиодных источников излучения [7].

Первым этапом проектирования многокомпонентного светодиодного источника света (МСИС) является измерение параметров и характеристик составляющих его светодиодов. Для данного этапа был разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) для одновременного определения пространственно-энергетических, спектральных и цветовых параметров и характеристик источников оптического излучения (ИОИ) (рис. 1) и программа по его управлению. Отличительными особенностями данного комплекса являются: возможность оценки параметров и характеристик ИОИ в любой точке поля их излучения при реализации трехкоординатного сканирования пространства; одновременное определение цветовых параметров ИОИ и спектрального состава излучения, а также возможность оценки равномерности освещения зоны анализа [3].

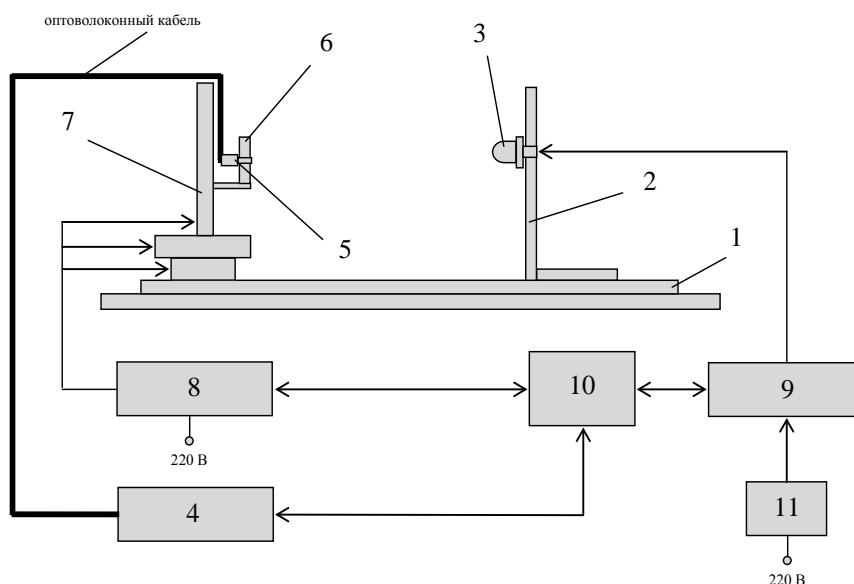


Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс контроля: 1 – оптическая скамья; 2 – устройство крепления ИОИ; 3 – исследуемый источник излучения; 4 – спектрометр «USB 4000»; 5 – оптоволоконный кабель; 6 – устройство крепления спектрометра; 7 – подвижное устройство; 8 – блок управления подвижным устройством; 9 – блок управления ИОИ; 10 – блок управления и обработки информации; 11 – блок питания

Основными элементами предложенного АПК являются спектрометр фирмы OceanOptics и моторизованные линейные трансляторы фирмы Standa. Автоматизация полного цикла

измерения реализуется при помощи разработанного в среде LabVIEW программного обеспечения.

Работа данного комплекса связана как с автоматическим поточечным сканированием пространства, так и с возможностью вывода на экран персонального компьютера результатов измерения (спектральной характеристики, пространственного распределения освещенности, полного светового потока, рассчитанных цветовых координат исследуемого образца и т. д.).

Работа программного обеспечения, написанного для АПК, основана как на управлении и получении данных с АПК, так и на обработке и представлении данных с АПК. Предлагаемое программное обеспечение было написано в программной среде LabVIEW и включает четыре блока (рис 2). Первый и второй блоки предназначены для подготовки устройств к работе (измеряется шумовая составляющая, настраивается яркость ИОИ под порог чувствительности спектрометра).

Третий блок связан с расчетом и представлением пространственно-энергетических и спектральных параметров и характеристик. Начало его работы зависит от оператора (корректировка расположения и/или размера области). После изменения (в случае необходимости) пространственных параметров программа переходит в автономный режим, и АПК начинает сканирование ИОИ. На данном этапе оно проходит уже с учетом шумовой составляющей, времени интегрирования и внесенных поправок (пространственные параметры). После окончания сканирования происходит сохранение данных и программа переходит на четвертый этап. Кроме того одновременно со сканированием данные проходят обработку, результатами которой являются: трехмерная модель пространственного распределения освещенности/облученности; график осевого сечения трехмерной модели; спектральная характеристика излучения ИОИ.

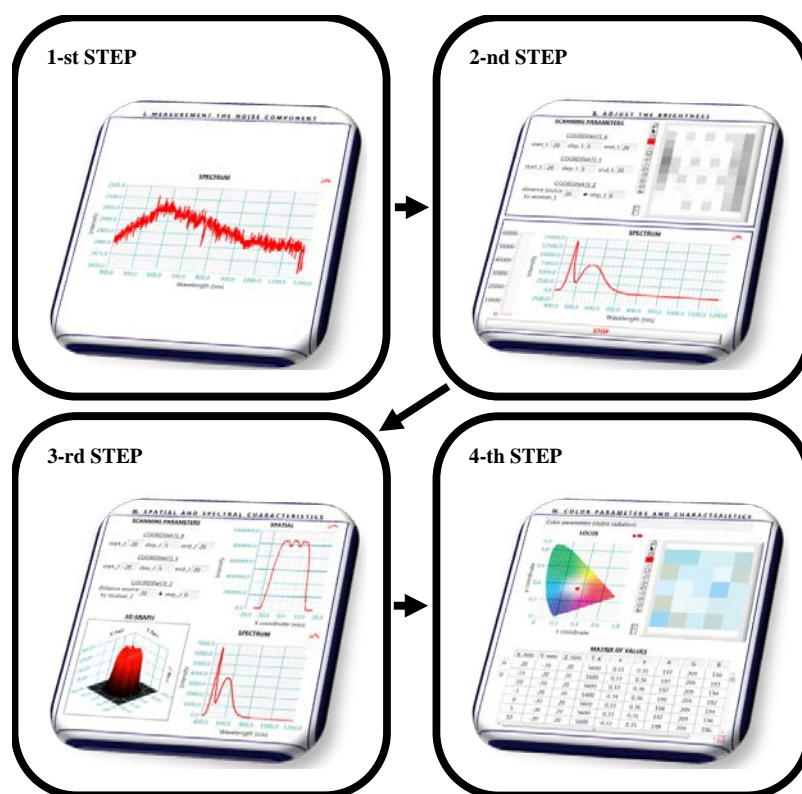


Рис. 2. Этапы работы программного обеспечения

Работа четвертого блока связана с расчетом и представлением цветовых параметров и характеристик источника излучения (пространственное распределение цвета, цветовая температура и т. д.). При этом, если ИОИ не излучает в видимом диапазоне длин волн, высвечивается надпись: «Impossible to calculate the color parameters (UV radiation)» или

«Impossible to calculate the color parameters (IR radiation)». В обратном случае высвечивается надпись: «Color parameters (visible radiation)».

На втором этапе работы осуществляется моделирование МСИС на основе результатов, полученных ранее. Для этого было написано программное обеспечение в среде LabVIEW. Основными его результатами являются структуры многокомпонентных источников и соответствующие им модели пространственного распределения освещенности/облученности на экране (расположенном на заданном расстоянии от источника), пространственное распределение цвета на экране (цветовая картина) и интегральная спектральная характеристика излучения многокомпонентного светодиодного источника. Работа программного обеспечения основана на обработке данных, полученных с помощью АПК. Оно включает в себя три блока (рис. 3).

В первом – задается структура проектируемого МСИС (указывается тип структуры источника излучения, количество излучающих элементов и т. д.). Второй блок связан с определением параметров и характеристик (пространственно-энергетических, цветовых и спектральных) светодиодов, входящих в состав проектируемого источника света.

Третий блок программного обеспечения предназначен для моделирования и визуализации параметров и характеристик проектируемого многокомпонентного светодиодного источника излучения (пространственное распределение освещенности, пространственное распределение цвета и т. д.). Данный блок программного обеспечения поделен на две части. Первая предназначена для представления пространственно-энергетических (пространственное распределение освещенности/облученности) и спектральных параметров, а также характеристик разрабатываемого многокомпонентного источника излучения. При этом оператор имеет возможность просмотреть изменения освещенности проектируемого МСИС по координатам x и y . Вторая часть программного обеспечения предназначена для представления цветовых (цветовое пространство, пространственное распределение цвета, цветовая температура) параметров. При этом если излучение МСИС не находится в видимом диапазоне длин волн, высвечивается надпись: «Impossible to calculate the color parameters (UV radiation)» или «Impossible to calculate the color parameters (IR radiation)». В обратном случае высвечивается надпись: «Color parameters (visible radiation)».

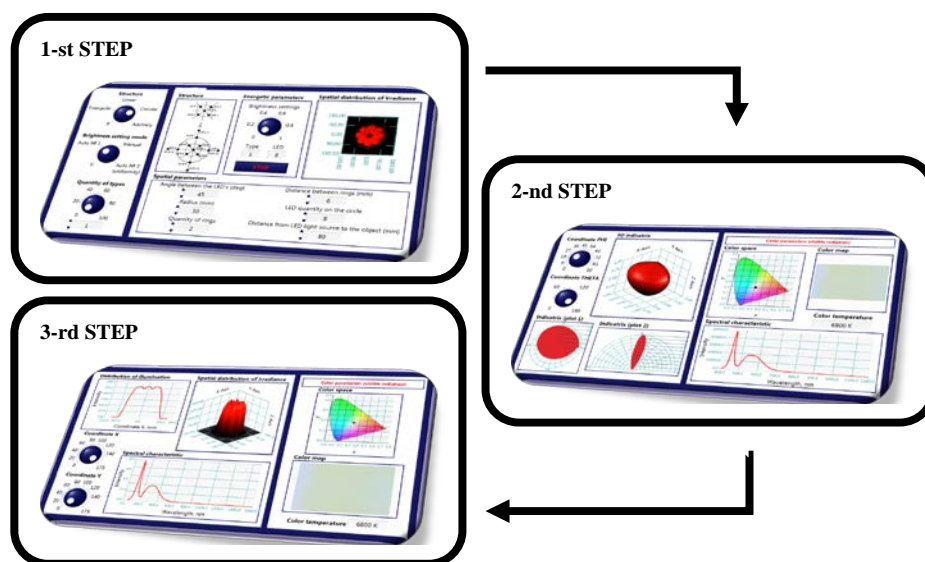


Рис. 3. Этапы работы программного обеспечения

В данной работе приведены результаты проектирования МСИС с круговым типом структуры. Представленная модель источника света состоит из 16 мощных светодиодов фирмы ARL. Данный источник излучения образован двумя кольцами по восемь светодиодов

на каждом, расположенных под углом 45° друг относительно друга. При этом радиус первого кольца — 30 мм, второго — 36 мм. Многокомпонентный источник излучения находится на расстоянии 250 мм от освещаемой поверхности, кроме того, он является источником белого света («холодного» свечения) с цветовой температурой 6800 К (цветовая температура рассчитана интегрально).

Заключение

Настоящая работа является продолжением работ коллектива авторов по созданию специализированных устройств подсветки для оптико-электронных систем, приборов и комплексов промышленного контроля с целью обеспечения оптимальных условий наблюдения и анализа, а также соответствующих автоматизированных устройств измерения и контроля параметров и характеристик источников излучения.

Представленная в работе методика проектирования светодиодных источников света с заданными параметрами излучения учитывает основные законы формирования как светового потока, так и цветовых картин для различных типов источников излучения, и может быть использована при разработке или аттестации качества:

- многоэлементных светодиодных источников излучения различной геометрии (линейных, круговых и т. д.);
- адаптивных (меняющих спектральные и цветовые характеристики) источников освещения.

Публикации

1. *Алехин А.А., Перетягин В.С.* Двухканальная оптико-электронная система цветового анализа минералов // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 7. С. 90–91.
2. *Peretyagin V.S., Chertov A.N., Gorbunova E.V., Korotaev V.V.* Solution of multi-element LED light sources development automation problem // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9190. P. 919015.
3. Патент на полезную модель РФ 138629 «Устройство для контроля источников излучения», опубл. 20.03.2014.
4. Заявка на изобретение РФ 2013158588 «Способ измерения параметров и характеристик источников излучения», опубл. 27.12.2013.

Литература

1. *Hui K.N., Hui K.S.* Vertically-stacked LEDs with invariance of color Chromaticity // Current Applied Physics. 2011. Vol. 11. No 3. P. 662–665.
2. *Lei Z., Xia G., Ting L., Xiaoling G., Ming L.Q., Guangdi S.* Color rendering and luminous efficacy of trichromatic and tetrachromatic LED-based white LEDs // Microelectronics Journal. 2007. Vol. 38. No 1. P. 1–6.
3. *Narendran N., Maliyagona N., Deng L., Pysar R.* Characterizing LEDs for general illumination applications: mixed-color and phosphor-based white sources // Proceedings of SPIE. 2001. Vol. 4445. P. 137–147.
4. *Dong J.T., Lu R.S., Shi Y.Q., Xia R.X., Li Q., Xu Y.* Optical design of color light-emitting diode ring light for machine vision inspection // Optical Engineering. 2011. Vol. 50. No 4. P. 043001.
5. *Liang K., Li W., Ren H.R., Liu X.L., Wang W.J., Yang R., Han D.J.* Color measurement for RGB white LEDs in solid-state lighting using a BDJ photodetector // Displays. 2009. Vol. 30. No 3. P. 107–113.
6. *Gorbunova E.V., Peretyagin V.S., Chertov A.N.* Automated hardware and software complex for extended light sources verification // Proceedings of SPIE. 2013. Vol. 8788. P. 87883Q.
7. *Peretyagin V.S., Chertov A.N., Gorbunova E.V., Korotaev V.V.* Solution of multi-element LED light sources development automation problem // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9190. P. 919015.



Подшивалов Александр Валерьевич
Инженерно-физический факультет
Кафедра информационных технологий топливно-энергетического
комплекса
E-mail: podshivalov2005@mail.ru

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗОВОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ В КОМПЛЕКСНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМАХ

А.В. Подшивалов

Научный руководитель – профессор В.В. Зуев

Для современной науки и промышленности в области полимеров все более актуальной становится проблема создания новых конструкционных и функциональных полимерных материалов, которые в будущем позволят повысить функциональность производимой из них продукции, а также снизить ее себестоимость по отношению к существующим аналогам. Создание новых полимерных материалов также зарождает предпосылки к разработке совершенно новых видов продукции и услуг, например в сферах медицины, микроэлектроники и hi-tech-устройств, экологии, машиностроения, легкой промышленности и т. д., что в свою очередь позволяет формировать современный уровень техники.

Изучение процессов фазового структурирования и образования фаз в процессах создания полимерных материалов является важнейшей задачей для их получения, так как позволяет оптимизировать производственный процесс и получать материалы с заданными характеристиками, а также снизить себестоимость готового материала. Актуальность применения новых полимерных материалов диктует необходимость детального изучения процессов образования их структуры на микро- и наноуровнях. Наиболее общим и физически оправданным способом описания формирования морфологии и надмолекулярной структуры полимерных систем является термодинамический подход. Для изучения процессов в данных системах/процессах применяется актуальный метод аналитического описания в рамках необратимой термодинамики с использованием термодинамической модели агрегации.

Процессы, происходящие при образовании данных смесей/процессов, представляется возможным изучить лишь после завершения их приготовления. Целями проекта является изучение процессов фазового структурирования и морфологии при образовании различных по природе многокомпонентных полимерных систем и процессов, а также оптимизация процесса их производства. В рамках проекта для изучения объектов исследования применялся комплексный метод, включающий статистический анализ электронных микрофотографий заранее приготовленных полимерных смесей или чистых полимеров и последующее аналитическое описание процессов формирования фаз и структуры в рамках необратимой термодинамики с использованием уравнения модели агрегации.

В число изучаемых на данный момент систем и процессов входят:

- смеси несовместимых термопластичных полимеров:
 - смесь биоразлагаемых полимеров полилактид (ПЛА)/сополимер α -оксимасляной и α -оксивалерьяновой кислот (ПОМВ);
 - смесь конструкционных термопластов полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)/полиамид-6 (ПА-6), а также их композит с эмульгатором органически-модифицированная глина (20А) и промышленным совместителем блок сополимером стирол-этилен/бутилен-стирол с привитым малеиновым ангидридом (SEBS-g-MA);
- процессы образования актуальных функциональных полимерных материалов;
- процесс микрокапсулирования целебного калангового масла полиуретаном;

• процесс окислительной полимеризации анилина в водном растворе с образованием полианилина (ПАНИ).

Для решения поставленных задач в проекте используется комплексный метод, позволяющий описывать эволюцию образующейся микро- и наноструктуры в процессе образования полимерной смеси или функционального полимера. Данный метод реализуется в четыре стадии:

– приготовление образцов смесей полимеров или синтез функционального полимера для последующей электронной микроскопии;

– электронная микроскопия полученных образцов и ее сегментация в графическом редакторе;

– статистический анализ полученных микрофотографий с использованием специального программного обеспечения «UTHSCSA Image Tool 3.0» и построение гистограмм размера образующихся агрегатов;

– аналитическое описание полученных гистограмм с использованием уравнения модели агрегации (1) путем подгонки термодинамических параметров образования фаз в системах.

В основе модели агрегации лежат принципы термодинамики необратимых процессов, используемые для описания эволюции микроструктуры, которая в каждый момент времени рассматривается как последовательность ограниченных квазиравновесных состояний. В рамках модели статистическое распределение размера частиц/гранул/микрокапсул и т. д. $h(s)$ имеет вид [1]:

$$h(s) = \sum_i^{i=N} a_i s_i^2 \exp\left(-\frac{s_i \Delta u_{0i}}{kT}\right), \quad (1)$$

где a_i – нормировочный параметр, s_i – площадь частиц/гранул/микрокапсул и т. д., Δu_{0i} – энергия агрегации, T – абсолютная температура, k – константа Больцмана, N – количество статистических ансамблей, i – номер статистического ансамбля.

Важной особенностью модели является возможность оценить количество и характер процессов, происходящих во время формирования фаз в смеси полимеров или в ходе процесса синтеза функционального полимера путем вычисления подгоночным способом параметра N .

Изучение смеси биоразлагаемых термопластичных полимеров ПЛА/ПОМВ

В современном мире все большую актуальность приобретают экологические проблемы. Одной из них является загрязнение окружающей среды не разлагаемыми упаковочными и отработанными конструкционными полимерными материалами с длительным сроком деградации в почве. На замену таким материалам приходят новые полимерные системы, основанные на алифатических биоразлагаемых полимерах. Эти полимеры обладают гидролизующей углеродной основой, являющейся питательной средой для бактерий и ферментов, поэтому они способны гораздо быстрее деградировать в условиях естественной окружающей среды.

Одним из самых распространенных биоразлагаемых полимеров является полилактид (ПЛА), получаемый полимеризацией молочной кислоты, которая образуется путем ферментации и брожения возобновляемых природных ресурсов, таких как зерно, патока сахарного тростника, а также крахмал. ПЛА полностью разлагается микроорганизмами, удобряет компост, является биологически совместимым, нерастворим в воде, а также оптически активным и прозрачным термопластом. По этим причинам он широко используется в промышленности, например, при производстве текстильных волокон, ламинирования бумаги и пленок, для упаковки пищевых продуктов, в медицине (шовные материалы и имплантаты) и фармакологии (системы доставки лекарственных средств).

Главные недостатки чистого ПЛА – его высокая хрупкость, медленная кристаллизация, быстрое старение при комнатной температуре, низкая термическая стабильность и плохая газопроницаемость. Они препятствуют применению ПЛА в промышленности при изготовлении конструкционных материалов и упаковочной продукции. Поэтому ПЛА целесообразно использовать в смеси с другим пластифицирующим полимером – сополимером α -оксимасляной и α -оксивалериановой кислот (ПОМВ), относящимся к семейству полигидроксиалканоатов – алифатических полиэфиров, синтезируемых микроорганизмами. Являясь биоразлагаемым, ПОМВ обладает свойствами схожими со свойствами синтетических термопластов. В связи с этим, целью настоящей работы являлось изучение морфологии материалов, получаемых при смешении ПЛА с ПОМВ в различных соотношениях: от 0/100 до 100/0.

В результате исследований удалось установить, что при увеличении концентрации минорного компонента происходит образование двух ансамблей частиц: диспергированных и коалесцированных. Показано, что диаметр диспергированных частиц при увеличении концентраций компонентов возрастает незначительно: от 0,4 до 1,2 мкм, а коалесцированные частицы сильно увеличиваются и достигают диаметра ~4,8 мкм для состава 50 %/50 %, что в сопоставлении с механическими показателями смеси при растяжении говорит о положительном влиянии коалесцированных частиц на ее механические свойства [2].

Изучение конструкционной смеси термопластов ПЭНП/ПА-6 с добавками эмульгатора и совместителя

В промышленности при создании недорогих конструкционных смесей термопластичных полимеров производители часто прибегают к использованию различных добавок эмульгаторов и совместителей. Поэтому изучение влияния различных добавок на морфологию и процессы фазового структурирования при формировании смеси конструкционных полимеров ПЭНП/ПА-6 представляется актуальным.

Цель настоящей работы – изучение морфологии смеси коммерческих полимеров: полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и полиамида-6 (ПА-6) в соотношении 75 %/25 %. Для улучшения совместимости полимеров в смесь вводили добавки: эмульгатор – органически модифицированную глину (20А) и промышленный совместитель – блок-сополимер стирол-этилен/бутилен-стирол с привитым малеиновым ангидридом (SEBS-g-MA).

На первом этапе исследований при смешивании полимеров в смесительный экструдер последовательно добавляли эмульгатор 20А в количестве 5 ‰ (промилле) и 10 ‰. На втором этапе к смеси добавляли сначала совместитель SEBS-g-MA в количестве 2 ‰, а затем эмульгатор 20А в количестве 0,22 и 1,33 ‰.

В результате проведенных исследований оказалось, что гистограммы размера частиц фазы ПА-6, распределенной в фазе ПЭНП удалось описать с использованием модели агрегации (1). Как и в случае со смесью ПЛА/ПОМВ, было выявлено наличие двух процессов при формировании смеси: образование индивидуальных частиц ПА-6 и их коалесценция, также удалось определить средний размер этих частиц. Сопоставление полученных результатов с данными механических испытаний позволило установить, что добавка 20А существенно увеличивает диспергирование частиц фазы ПА-6, приводящее к получению материала с высокими механическими характеристиками при испытаниях на растяжение. При совместном использовании совместителя SEBS-g-MA и эмульгатора 20А избежать коалесценции частиц фазы ПА-6 не удается [3].

Исследование процесса микрокапсулирования полиуретаном целебного калангового масла

Капсулирование функционально активных веществ в полых микросферах является эффективным способом их хранения и защиты от окружающей среды. Микрокапсулирование веществ уже используется для получения медикаментов

направленного действия, замедлителей горения, в парфюмерной, легкой и текстильной промышленности и во многих других отраслях промышленности.

В настоящей работе исследовался процесс микрокапсулирования целебного калангового масла полиуретаном путем межфазной полимеризации в эмульсии типа «масло в воде». Особый интерес к каланговому маслу вызван его антибактериальной активностью (против бактерий стафилококка) при обработке хлопчатобумажных тканей. Цель работы заключалась в оценке влияния скорости эмульгирования компонентов в ходе процесса микрокапсулирования на формирование, структуру и размер микрокапсул.

Статистические распределения удалось описать только с использованием бимодального уравнения модели обратимой агрегации (1) при $N = 2$, что свидетельствует о существовании двух статистических ансамблей микрокапсул. Таким образом, можно заключить, что в ходе микрокапсулирования одновременно протекают два процесса: образование первичных микрокапсул и их коалесценция. Аналитическое описание гистограмм позволяет определить средний размер микрокапсул.

Из установленной зависимости между средним размером микрокапсул и скоростью эмульгирования исходных компонентов видно, что повышение скорости от 2000 до 4000 об/мин оказывает наибольшее влияние на размер микрокапсул в обоих ансамблях. При больших скоростях размер микрокапсул меняется незначительно.

С использованием термогравиметрического анализа было определено содержание масла внутри микрокапсул. Результаты анализа показывают, что по мере увеличения скорости перемешивания компонентов доля калангового масла внутри микрокапсул возрастает [4].

Изучение кинетики роста наноструктуры полианилина в процессе окислительной полимеризации анилина

ПАНИ является одним из наиболее востребованных проводящих полимеров благодаря простоте его синтеза и экологической стабильности. В настоящее время ПАНИ применяется для изготовления многих высокотехнологичных устройств, включая электроды для точной электроники, химические датчики, электроды для светодиодов, конденсаторы и батареи. Эти устройства очень чувствительны к форме частиц ПАНИ и его молекулярной массе, определяемых условиями синтеза. Поэтому исследование кинетики окислительной полимеризации анилина является необходимым условием для понимания свойств, морфологии и спектра применения ПАНИ.

Целью работы было изучение кинетики процесса полимеризации анилина с образованием гранулированной структуры ПАНИ путем оценки размеров образующихся гранул и определения энергии образования (энергия агрегации) Δu_0 (1), для различных по размеру гранул.

Согласно уравнению модели агрегации (1) гранулы ПАНИ образуют один статистический ансамбль, за исключением точки, соответствующей трем минутам реакции полимеризации, для которой статистические распределения были описаны уравнением в бимодальной форме (1) при $N = 2$, что свидетельствует о протекании двух процессов: медленного образования индивидуальных гранул и их быстрого слипания. В итоге к четырем минутам реакции на подложке образуется сплошной слой гранул (монослой).

Аналитическое описание гистограмм размера гранул ПАНИ и визуальный анализ микрофотографий показывают, что в начале реакции (1 мин) на предметном стекле образуются первичные гранулы ПАНИ, далее их количество и размер увеличивается (2 мин), а затем гранулы, достигнув максимального размера, образуют плотно упакованную гранулированную пленку или монослой ПАНИ (3 мин). Затем в промежутке от 4 до 8 мин количество гранул сильно возрастает, а их размер уменьшается. Это свидетельствует об образовании новых гранул непосредственно на их монослое, образовавшемся в течение первых трех минут реакции.

В результате данного исследования успешно изучена кинетика процесса окислительной полимеризации анилина. Установлено, что синтез ПАНИ данным методом может быть описан как топохимический процесс и состоит из трех стадий: образование и рост первичных гранул, образование монослоя ПАНИ и образование на нем новых гранул. Учитывая топохимическую природу реакции, стало возможным впервые прямым методом определить ее скорость, которая указывает на возможный автокаталитический характер процесса [5].

Заключение

Получаемые в ходе реализации проекта результаты имеют большое значение для различных сфер промышленности и производства:

– для усиления прочностных характеристик биоразлагаемого материала можно подобрать оптимальный режим смешивания компонентов термопластичных полимеров ПЛА/ПОМВ за счет изменения размера частиц минорного компонента в смеси;

– становится возможным улучшить качество и снизить себестоимость готового продукта на аппаратах экструзионного типа на базе предприятий подобрав оптимальный режим смешивания полимер-композита ПЭНП/ПА-6 с эмульгатором и совместителем;

– микрокапсулирование целебного калангового масла полиуретаном позволяет оптимизировать режим синтеза микрокапсул, содержащих не только каланговое масло, но и другие вещества, полезные свойства которых необходимо консервировать длительное время.

– результаты исследования кинетики роста наноструктуры ПАНИ в ходе окислительной полимеризации анилина, позволяют оптимизировать его производство для применения в устройствах класса «Hi-tech» на базе малых предприятий, например, таких как сенсоры и датчики химических веществ, нанобатареи и суперконденсаторы и т. д.

В настоящее время ведется проработка иных путей применения этих важнейших результатов, а также исследуются другие многокомпонентные системы, имеющие большое практическое значение.

Публикации и литература

1. *Kilian H.-G., Bronnikov S., Sukhanova T.* Transformations of the micro-domain structure of polyimide films during thermally induced chemical conversion: characterization via thermodynamics of irreversible processes // *Journal of Physical Chemistry B*. 2003. Vol. 107. No 49. P. 13575–13582.
2. *Podshivalov A.V., Gerard T., Budtova T.V., Bronnikov S.V.* Polylactide/poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) blends: morphology and mechanical properties // *eXPRESS Polymer Letters*. 2014. Vol. 8. No 8. P. 609–617.
3. *Подшивалов А.В., Зув В.В., Бронников С.В.* Влияние добавок эмульгатора и совместителя на морфологию и механические свойства смеси полиэтилена с полиамидом-6 // *Вопросы материаловедения*. 2012. № 4 (72). С. 363–369.
4. *Podshivalov A.V., Bronnikov S.V., Zuev V.V., Jiamrungraksa T., Charuchinda S.* Synthesis and characterization of polyurethane-urea microcapsules containing galangal essential oil: statistical analysis of encapsulation process // *Journal of Microencapsulation*. 2013. Vol. 30. No 2. P. 198–203.
5. *Podshivalov A.V., Zuev V.V., Bronnikov S.V., Shishov M.A.* The oxidative polymerization of aniline as topochemical process. The statistical analysis of grain growth // *European Polymer Journal*. 2013. Vol. 49. No 10. P. 3271–3276.



Попов Антон Игоревич
Естественнонаучный факультет
Кафедра высшей математики
E-mail: popov239@gmail.com

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ СТОКСА С ВЫСОКИМИ КОНТРАСТАМИ ВЯЗКОСТИ

А.И. Попов

Научный руководитель – профессор В.М. Уздин

Задача Стокса для случая высоких контрастов вязкости является серьезной вычислительной проблемой для гео моделирования. На границе двух сред вязкость меняется скачком (иногда на несколько порядков). Использование стандартных вычислительных алгоритмов приводит к существенным ошибкам в решении на границе и вблизи границы раздела двух сред. Точное решение уравнений Стокса и неразрывности важно при моделировании тектонических процессов, происходящих в мантии Земли.

Проблема численной обработки высоких контрастов вязкости и плотности интенсивно изучалась в конце XX в. Результаты на сегодняшний день таковы: задача Стокса может быть решена достаточно быстро при использовании конечно-разностной дискретизации и мультисеточного метода. К сожалению, алгоритм быстро сходится только при постоянной вязкости. Нас же интересует задача Стокса с вязкостью, меняющейся скачкообразно. Результаты моделирования показывают, что вязкость, как правило, изменяется скачком лишь на ограниченном наборе участков малого объема. Поэтому здесь можно воспользоваться теорией уравнений в частных производных и аппаратом математической физики, где подобные возмущения хорошо изучены.

Первые работы, посвященные локальным возмущениям, возмущениям конечного ранга и т. д. были опубликованы еще в 1930-х годах. Современная теория возмущений основана на формуле Крейна, граничных тройках и т. д. Данные методы позволяют сравнительно легко посчитать резольвенту возмущенного оператора на кривых, поверхностях и фракталах.

В численных методах аналогом формулы Крейна является формула Шермана-Моррисона-Вудбари, позволяющая обратить матрицу возмущенного оператора. Мы предлагаем применить ее к оператору для уравнений Стокса и неразрывности следующим образом: оператор разбиваем на два. Матрицу для первого оператора обратим, используя солвер для постоянной вязкости. Ранг второй матрицы будет пропорционален скачку вязкости. В этом случае нам поможет формула Вудбари, позволяющая получить точное решение для задачи с переменной вязкостью. В проекте предполагается разработать алгоритм для поиска численного решения на основе формулы Вудбари. Данный метод хорош быстротой, поскольку в нашем случае скорость расчета не зависит от скачков вязкости.

Постановка задачи

Течение жидкости в мантии Земли описывается решением уравнения Стокса:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = -\rho g_i. \quad (1)$$

Для вязкой несжимаемой жидкости уравнение Стокса описывает связь между приложенными внешними силами и возникающим в жидкости вязким напряжением. Здесь сила вязкости – это градиент тензора напряжения \mathbf{s} , приложенные внешние силы – произведение плотности ρ и ускорения свободного падения \mathbf{g} . При отсутствии плавления

и фазовых переходов жидкость в геодинатике считается несжимаемой. Чтобы обеспечить несжимаемость, к уже упомянутому уравнению Стокса необходимо добавить уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

где \mathbf{v} – вектор скорости, x_i – координата в пространстве. Размер области обозначим за Ω , $\Omega \subset \mathbb{R}^d$. Наш метод не имеет ограничений по размерности пространства \mathbb{R}^d , однако для простоты изложения мы будем рассматривать двумерный случай.

Уравнения для сохранения импульса и массы необходимо дополнить двумя граничными условиями. Разобьем границу Ω на две непересекающиеся области: $\partial\Omega_N$ и $\partial\Omega_D$. Тогда граничные условия можно записать в виде:

$$\sum_{j=1}^d \sigma_{ij} n_j = a_i, \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega_N, \quad i=1, \dots, d \quad (3)$$

$$\text{и } \mathbf{v} = \mathbf{b}, \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega_D. \quad (4)$$

Здесь \mathbf{n} обозначает внешнюю нормаль к границе Ω , \mathbf{a} – приложенное усилие, \mathbf{b} – скорость на $\partial\Omega_D$.

Теперь опишем механическое поведение материала. Учитывая изотропную вязкую реологию, связь тензора напряжения \mathbf{s} с тензором скорости деформации \mathbf{e} дается выражением:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\eta\dot{\epsilon}_{ij}, \quad (5)$$

где δ – символ Кронекера, p – давление, η – вязкость жидкости. Скорость деформации дается формулой:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (6)$$

Перед тем, как проводить дискретизацию, избавимся от величин, имеющих размерность в приведенных выше уравнениях. Для этого выполним процедуру динамического масштабирования. Сначала определим набор характерных единиц для данной задачи: характерная длина (размер области), характерное время (время деформации), характерная вязкость (минимум вязкости в области). Затем поделим величины, присутствующие в уравнениях (масса, напряжение, сила и другие) на соответствующие характерные единицы. Получим набор безразмерных величин, равных одному. Обратное масштабирование, то есть возврат к размерным единицам, проводить не будем. Следовательно, ошибки для скорости и давления также будут безразмерными величинами.

Дискретизация

Решаем уравнения (1) и (2) относительно переменных v_i и p . Эти уравнения можно привести к виду:

$$\sum_{j=1}^d \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} = -\rho g_i, \quad i=1, \dots, d. \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^d \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0. \quad (8)$$

Используем конечно-разностную дискретизацию на неколеблущейся сетке:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_j^{-1} \nabla_j (\eta (h_j^{-1} \Delta_j v_i + h_i^{-1} \Delta_i v_j)) + \\ \sum_{j \neq i} h_j^{-1} \Delta_j (\eta (h_j^{-1} \nabla_j v_i + h_i^{-1} \nabla_i v_j)) - h_i^{-1} \nabla_i p = -\rho g_i, \\ \sum_{i=1}^d h_i^{-1} \Delta_i v_i = 0, \end{array} \right. \quad (9)$$

где h_i – размер ячейки, Δ_i и ∇_i определены ниже:

$$\begin{aligned} \Delta_j f(x_1, \dots, x_d) &= f(x_1, \dots, x_i + h_i, \dots, x_d) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_d), \\ \nabla_j f(x_1, \dots, x_d) &= f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_d) - f(x_1, \dots, x_i - h_i, \dots, x_d). \end{aligned}$$

Алгоритм Эрроу-Гурвица

Уравнение (9) можно привести к виду:

$$L \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\rho \mathbf{g} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где \mathbf{v} – поле скоростей, оператор L определяется своей матрицей:

$$L = \begin{pmatrix} S & D \\ D^* & 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

S и D , в свою очередь, определены следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} (S\mathbf{v})_i &= h_j^{-1} \nabla_j (\eta (h_j^{-1} \Delta_j v_i + h_i^{-1} \Delta_i v_j)) + \\ &\sum_{j \neq i} h_j^{-1} \Delta_j (\eta (h_j^{-1} \nabla_j v_i + h_i^{-1} \nabla_i v_j)), \end{aligned} \quad (12)$$

$$(Dp)_i = h_i^{-1} \nabla_i p, \quad D^* \mathbf{v} = \sum_i h_i^{-1} \nabla_i v_i. \quad (13)$$

Уравнение (10) относится к задаче о поиске седловой точки. Его решение может быть получено методом итераций как предел $(\mathbf{v}, p)^T$ аппроксимаций (\mathbf{v}_k, p_k) . Например, с помощью одной из разновидностей алгоритма Эрроу-Гурвица:

$$\mathbf{v} = \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{v}^k, \quad p = \lim_{k \rightarrow \infty} p^k, \quad (14)$$

$$\mathbf{v}^{k+1} = \mathbf{v}^k + \varepsilon (-\rho \mathbf{g} + S\mathbf{v}^k - Dp^k), \quad p^{k+1} = p^k + \omega D^* \mathbf{v}^k. \quad (15)$$

К сожалению, нельзя гарантировать сходимость итерационного метода для произвольной вязкости η , выбрать параметры релаксации ε , ω также весьма сложно. Однако, если считать вязкость η постоянной, решение можно получить довольно быстро, используя, например, мультисеточный метод или преобразование Фурье.

Формула Вудбари

Аналогом формулы Крейна в дискретном случае является формула Вудбари. Будем использовать только одно из приложений этой формулы.

Допустим, что A – матрица размером $N \times N$, U и V – матрицы $N \times M$, где $M < N$. С помощью формулы Вудбари для матрицы A , возмущенной оператором UV^T , мы можем посчитать обратную. Для этого нужно вычислить поправку к обращенной матрице A :

$$(A + UV^T)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}U(E + V^T A^{-1}U)^{-1}V^T A^{-1}, \quad (16)$$

где E – единичная матрица. A^{-1} считаем известной. Нам осталось обратить матрицу $E + V^T A^{-1}U$ размера $M \times M$.

Решаем уравнение. Выберем матрицы-столбцы $\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k, k = 1, \dots, r, r := \text{rank } UV^T$, так чтобы:

$$UV^T = \sum_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T.$$

Наша цель – решить следующее уравнение для любой правой части \mathbf{b} :

$$\left(A + \sum_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T \right) \mathbf{x} = \mathbf{b}. \quad (17)$$

Для этого потребуется сделать несколько шагов.

– Решаем r вспомогательных задач:

$$A\mathbf{z}_k = \mathbf{u}_k$$

и из полученных решений \mathbf{z}_k строим матрицу $Z, Z = (\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_r)$.

– Обращаем матрицу

$$H = (E + V^T Z)^{-1},$$

где E – единичная матрица.

– Решаем еще одну вспомогательную задачу:

$$A\mathbf{y} = \mathbf{b}.$$

– Тогда решение задачи дается следующим соотношением:

$$\mathbf{x} = \mathbf{y} - ZHV^T \mathbf{y}.$$

Основные достигнутые результаты. Применение формулы Вудбари к системе уравнений Стокса и неразрывности

Рассмотрим оператор $L = L_0 + L_p$. Обозначим за n общее число узлов сетки, за r – число узлов, где градиент $\Delta_j \eta_s$ не равен 0. Ранг оператора S_p меньше либо равен $r \cdot d$, где d – размерность пространства. Согласно определению, ранг оператора L_p совпадает с рангом S_p . Нам нужно, чтобы r было меньше n (общее число ячеек сетки). Пусть $A = L_0, U$ – единичный оператор, $V = L_p$. Тогда можно применить выражение (16) и обратить L_0 одним из итерационных методов, например мультисеточным. Процедура применения формулы такова:

- $r + 1$ раз решаем уравнение $L_0 x = y$. Сложность операции зависит от метода и может варьироваться от $O(n^d)$ до $O(n)$;
- обращаем матрицу размера $r \times r$. Здесь количество операций будет меньше чем $O(r^3)$.

Конечно, при больших r время вычисления $H = (E + V^T Z)^{-1}$ и затраченные ресурсы могут быть больше, чем в случае прямого обращения S . Однако в обычной ситуации у данного метода есть два преимущества:

- решение будет получено для любого η_s . В отличие от мультисеточного метода, здесь нет необходимости подбирать параметры;
- сходимость S_0 , как правило, лучше, чем у S_p . Следовательно, при малых r метод, основанный на формуле Вудбари, будет работать быстрее классического мультисеточного метода.

Тесты показывают, что ошибки в вычислении L_0^{-1} не оказывают критического влияния на точность метода. В большинстве случаев если невязка при вычислении L_0 меньше, чем 10^{-n} , то невязка для итогового решения будет порядка 10^{-n+1} .

Заключение

Предложенный метод имеет следующие преимущества:

- позволяет получить решение системы уравнений Стокса и неразрывности за фиксированное время. Таким образом, скорость метода не зависит от контраста вязкости;
- для малых η_p он будет работать быстрее итерационных.

Заметим, что большое число операций в предложенном подходе связано с обращением матрицы оператора L_0 (при постоянной вязкости). Следовательно, если границы области зафиксированы, обращать матрицу придется только один раз. Далее ее можно будет использовать для различных распределений вкраплений высокой вязкости. Более того, для областей с несложной геометрией для поиска L_0^{-1} можно воспользоваться преобразованием Фурье. Соответствующие собственные функции для L_0 должны быть известны. Собственные функции зависят только от геометрии области и граничных условий. Так что, если необходимо исследовать течения Стокса в какой-то конкретной области для различных распределений вкраплений высокой вязкости, нужно искать собственные функции только один раз. Затем их можно использовать для всех задач.

Итак, несколько улучшений для описанной техники:

- если $\eta_r = 0$, решение можно получить быстрее, используя преобразование Фурье для обращения L_0 ;
- вариант мультисеточного метода можно использовать для одновременного вычисления z_k , что уменьшит сложность алгоритма.

Области возможного применения результатов проекта

Найдено решение системы уравнений Стокса и неразрывности в отсутствие трения в случае сильных контрастов вязкости. Данная задача решена численно с использованием алгоритма, основанного на формуле Шермана-Моррисона-Вудбари. Численный алгоритм, основанный на формуле Вудбари, позволяет получить решение задачи в случаях, когда вязкость жидкости меняется скачком на порядок (и даже на несколько порядков, максимум – до 10). Более того, решение не зависит от контраста вязкости. Данный метод полезен для расчета течений в случае резких контрастов вязкости, что представляет наибольшую трудность для вычислений. Работа алгоритма была протестирована на кластере Brutus (Швейцарский технологический институт г. Цюрих, Швейцария). Результаты тестов приведены на рисунках в приложении. Работа велась совместно с кафедрой геофизики Швейцарского федерального технологического института г. Цюрих (ETH Zurich).

Публикации

1. Gerya T., Lobanov I.S., Popov A.I., Popov I.Yu., Popov S.I. Practical analytical solutions for benchmarking of 2-D and 3-D geodynamic Stokes problems with variable viscosity // *Solid Earth*. 2014. Vol. 5. No 1. P. 461–476.
2. Popov A. I., Popov I. Yu., Lobanov I. S., Gerya T. Numerical approach to the Stokes problem with high contrasts in viscosity // *Applied Mathematics and Computation*. 2014. Vol. 235. P. 17–25.
3. Gerya T., Lobanov I.S., Popov A.I., Popov I.Yu. Benchmark solutions for nanoflows // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2014. Vol. 5. No 3. P. 391–399.
4. Popov A. I., Popov I.Yu., Lobanov I.S., Popov S.I., Gerya T. Practical analytical solutions for benchmarking of 2-D and 3-D geodynamic Stokes problems with variable viscosity [Electronic resource] // *Solid Earth Discussions*. 2013. Vol. 5. No 2. P. 2203–2281. URL: <http://www.solid-earth-discuss.net/5/2203/2013/sed-5-2203-2013.html> (accessed: 09.12.2013).
5. Popov A.I. High frequency wave packet concentrated near the moving line on the liquid surface // *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. Vol. 435. P. 012023.

6. Popov A.I. Wave walls for waves on the surface of a heavy liquid // Journal of Mathematical Sciences. 2013. Vol. 194. No 1. P. 83–97.
7. Popov A.I. Wave wall type solution for liquid surface waves // AIP Conference Proceedings. 2012. Vol. 1479. P. 728–731.
8. Babich V.M., Popov A.I. An asymptotic solution of the Hamilton-Jacobi equation concentrated near a surface // Journal of Mathematical Sciences. 2012. Vol. 185. No 4. P. 523–525.
9. Попов А.И. Волновые валы для волн на поверхности тяжелой жидкости // Записки научных семинаров ПОМИ. 2012. Т. 409. С. 151–175.
10. Babich V.M., Popov A.I. Quasiphotons of waves on the surface of a heavy liquid // Journal of Mathematical Sciences. 2011. Vol. 173. No 3. P. 243–253.
11. Бабич В.М., Попов А.И. Асимптотическое решение уравнения Гамильтона–Якоби, сосредоточенное вблизи поверхности // Записки научных семинаров ПОМИ. 2011. Т. 393. С. 23–28.
12. Бабич В.М., Попов А.И. Квазифотоны волн на поверхности тяжелой жидкости // Записки научных семинаров ПОМИ. 2010. Том 379. С. 5–23.



Посмитная Яна Станиславовна
Факультет точной механики и технологий
Кафедра нанотехнологий и материаловедения
E-mail: posmitnaya@rambler.ru

РАЗРАБОТКА СТЕКЛЯННО-ПОЛИМЕРНОГО МИКРОФЛЮИДНОГО ЧИПА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА БИОМОЛЕКУЛ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА

Я.С. Посмитная

Научный руководитель – профессор А.А. Евстапов

Целью работы являлась разработка и изготовление прототипа стекляннно-полимерного микрофлюидного чипа (МФЧ) для экспресс-анализа биомолекул в пробе методом электрофореза. Была предложена топология и конструкция микрочипа, разработана и изготовлена мастер-форма для получения микроразмерных структур (каналов) в полимере (полидиметилсилоксане) методом «мягкой» литографии; исследованы физико-химические методы обработки поверхностей материалов; изготовлены прототипы МФЧ и протестированы при разделении смеси олигонуклеотидов.

Важным направлением биологических и медицинских исследований является изучение генетических мутаций и полиморфизмов, которые могут видоизменять функции гена и являться причиной унаследованных болезней и других заболеваний. Широкий круг медицинских и биологических задач приводит к потребности создания доступных и надежных систем экспресс-диагностики, не требующих специальных условий эксплуатации и высокой квалификации персонала, а также обладающих высокой производительностью и чувствительностью. Идеальным вариантом аналитической системы, предназначенной для решения таких задач, является создание интегрированной системы, сочетающей устройства: для пробоподготовки и выделения нуклеиновых кислот; для амплификации и электрофоретического разделения продуктов реакции на единой платформе. Такой подход сложен для реализации и требует существенных экономических затрат.

Альтернативным вариантом является реализация отдельных стадий анализа на различных микрофлюидных устройствах: для пробоподготовки, амплификации и электрофоретического разделения получаемого продукта.

В работе описано создание прототипа устройства (МФЧ) для электрофоретического разделения исследуемой пробы. Электрофорез на микрочипе позволяет проводить анализ проб малых объемов с высокой производительностью и быстродействием [1]. Методами электрофореза на микрочипах успешно пользуются: для анализа неорганических и органических веществ; иммунного анализа; анализа пептидов; исследований фармацевтических препаратов; выявления патогенов и диагностики инфекционных заболеваний и т. д.

Процесс создания аналитического микрофлюидного устройства включает стадии: разработки топологии и конструкции микрочипа; изготовления микро- и наноразмерных структур; обработки поверхности; герметизации конструкции; контроля и испытаний готового устройства.

На основании анализа литературных данных была выбрана универсальная топология, объединяющая в себе топологии «Т-инжектор» и «простой крест» [2].

В качестве материалов для изготовления прототипов применялись:

- стекло марки Крон 8 (ГОСТ 3514-76, Россия) (мол. %: SiO_2 – 73,75; В – 9,83; ВаО – 1,28; K_2O – 4,28; Na_2O – 10,74; As_2O_3 – 0,12);
- полидиметилсилоксан (ПДМС) марки Sylgard® 184, молекулярная формула $(\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi})_n$, (Dow Corning Corporation, США).

С учетом приборных особенностей (имеющейся системы детектирования, расположения рабочих электродов и необходимой длины сепарационного канала) были определены соответствующие размеры, которые явились основой для топологии мастер-формы, приведенной на рис. 1. Конструкция полученного прототипа микрочипа представляла герметично соединенные между собой стеклянную пластину ($60 \times 15 \times 1,5 \text{ мм}^3$) и пленку ПДМС ($54 \times 14 \times 2 \text{ мм}^3$), в которой были сформированы микроканалы и резервуары. Глубина структур в полимерной пленке составила $\sim 19 \text{ мкм}$, диаметр резервуаров для загрузки пробы и слива отработанного материала – 2 мм.

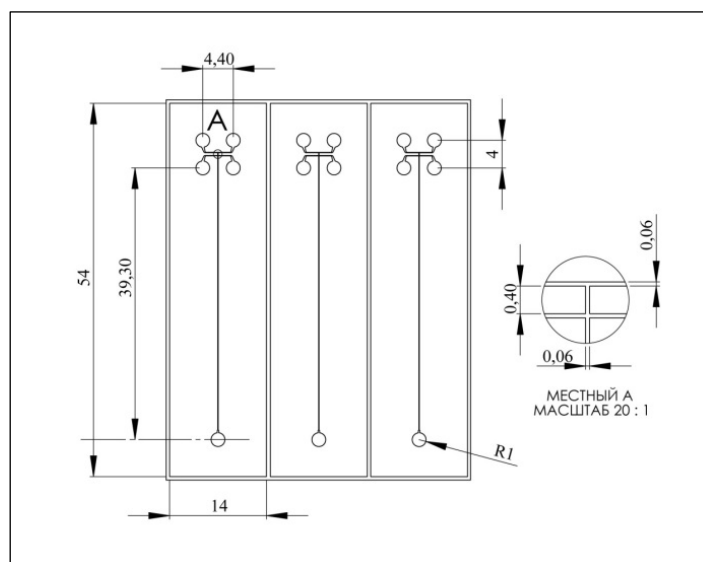


Рис. 1. Эскиз топологии мастер-формы, состоящей из трех секций для получения трех реплик из полимера (размеры указаны в мм)

На основании выполненного чертежа методом фотолитографии была изготовлена мастер-форма из кремния и фоторезиста SU-8 2025 (MicroChem Corp., США) в Научно-образовательном центре нанотехнологий Академического университета РАН (Санкт-Петербург).

После этого методом «мягкой» литографии [3] осуществлялось получение отпечатков из ПДМС, основанное на отверждении раствора полимера, помещенного поверх структур мастер-формы. Полученная реплика отделялась от формы (в ней формировались загрузочные отверстия) и соединялась со стеклянной пластиной после обработки высокочастотной плазмой в среде кислорода при низком давлении (установка Diener Zepto (Германия)).

Высота полученных на мастер-форме структур контролировалась на профилометре Ambios Technology (США) и составила 18 ± 1 мкм.

Для двух секций мастер-формы была измерена ширина каналов вблизи резервуаров Д и В (рис. 2), то есть в двух крайних точках сепарационного канала. Измерения проводились в режиме отраженного света на оптическом инвертированном микроскопе Axio Observer.D1m (Carl Zeiss, Germany).

Для полученных реплик также контролировались геометрические параметры каналов (ширина и глубина). Для этого из отвержденной полимерной пленки были вырезаны поперечные фрагменты канала. Измерения проводились на оптическом инвертированном микроскопе в режиме проходящего света с объективом $20\times$. Было рассчитано среднее значение по трем репликам, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации (КВ). Из-за относительно высокой длины канала (по сравнению с шириной), возникает разница в ширине между двумя крайними точками сепарационного канала (до 10 мкм), однако сами реплики обладают воспроизводимыми размерами каналов (КВ = 2–5 %).

Изображение готового прототипа МФЧ приведено на рис. 2. Стоит отметить, что в случае проведения электрофореза резервуары Д служат для загрузки пробы и буферного раствора и резервуар В является сливным, а при измерении электроосмотической подвижности загрузочным будет являться резервуар В.

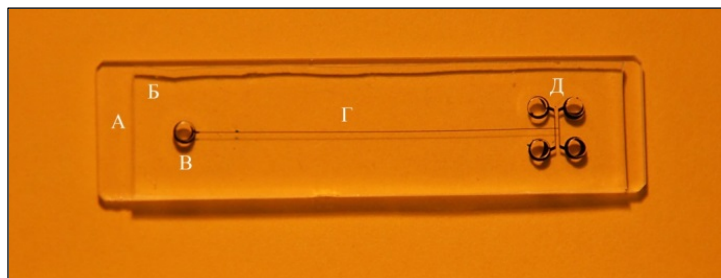


Рис. 2. Изображение стеклянно-полимерного МФЧ: А – стеклянная подложка, Б – полимерная пленка, Г – сепарационный канал, В и Д – резервуары для загрузки пробы и буферного раствора

Следующим этапом работы являлось исследование физико-химических методов и выбор условий обработки ПДМС для эффективной модификации рабочих поверхностей микрочипа с целью придания ему стабильных электроосмотических свойств.

В зависимости от объекта анализа и требуемого разрешения при разделении компонентов необходимым условием для получения воспроизводимых результатов является стабилизация электроосмотического потока (ЭОП) на заданном уровне, так как разделяемые компоненты могут как существенно, так и незначительно различаться по заряду и массе. Отрицательный поверхностный заряд, образующийся на стенках канала микрочипа, индуцирует образование слоя противоионов из жидкости, которые начинают двигаться к катоду при приложении электрического поля. Этот слой создает объемный поток жидкости – ЭОП, который может увеличивать или уменьшать скорость движения заряженных молекул (ионов). Его скорость зависит от плотности отрицательного заряда на поверхности канала и от величины рН раствора. ЭОП обычно наблюдается при $\text{pH} > 3$. Методами физико-химической модификации поверхности его можно уменьшить или даже обратить в противоположном направлении.

Для изучения влияния различных химических и физических методов обработки на свойства поверхности ПДМС были подготовлены пластины размером 24x48x1,5 мм³. Результаты обработки (изменение смачивания поверхности) контролировались с помощью метода лежащей капли на экспериментальной установке на базе оптического микроскопа PrimaExpert (ЛОМО, Россия). Проводилось по 6–8 измерений краевого угла (объем капли 20 мкл) для каждого образца, исследовалось свойство смачивания поверхности дистиллированной водой.

Были выбраны следующие способы обработки:

- высокочастотной плазмой в среде кислорода при низком давлении (установка Diener Zepto (Германия));
- водным раствором поливинилового спирта (ПВС) (Sigma-Aldrich Corp., США);
- водным раствором Kolliphor (Sigma-Aldrich Corp., США).

Согласно приведенным на рис. 3 зависимостям наиболее стабильными являются методы плазменной обработки и модификации раствором поливинилового спирта. Значения углов смачивания стабилизируются спустя два дня и меняются во времени незначительно.

В проведенных исследованиях электроосмотическая подвижность оценивалась по методу, описанному в работе [4] и основанному на регистрации зависимости изменения тока во времени при приложении напряжения по всей длине микроканала и в процессе смены концентрации буферного раствора. За счет изменения проводимости жидкости (при разбавлении) наблюдалось уменьшение величины тока во времени.

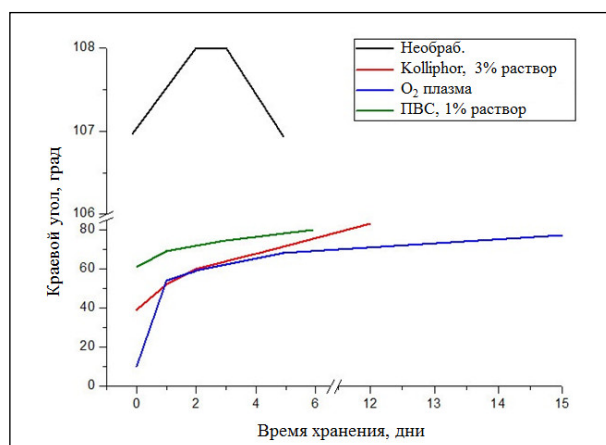


Рис. 3. Зависимости значений краевых углов образцов ПДМС после различных физико-химических методов обработки от времени хранения

Электроосмотическая подвижность μ_{EO} определялась по формуле:

$$\mu_{EO} = L * L / (U * \Delta t),$$

где L – длина сепарационного канала ($L = 45,2$ мм), U – напряжение электрофореза ($U = 1000$ В), $\Delta t = t_2 - t_1$ – время изменения величины тока – определялось экспериментально.

Для исследований было изготовлено несколько экспериментальных образцов МФЧ. Используемый буфер – 50 мМ Na₂V₄O₇, pH=9,4. Измерения проводились на микрофлюидной аналитической системе МФАС-01 (ИАП РАН, Россия).

Измерения электроосмотической подвижности в МФЧ проводились:

- в необработанном чипе (№ 4);
- после обработки плазмой в кислородной среде (чипы № 1–3);
- после обработки раствором поливинилового спирта (ПВС) (чипы № 1 и 3);
- после обработки раствором Kolliphor (чипы № 6 и 7).

Результаты расчетов средней величины μ_{EO} (по данным 6–7 измерений для каждого микрочипа) с указанием среднего квадратического отклонения (СКО) и коэффициента вариации (КВ) приведены в Табл. 1.

Полученные данные свидетельствуют о нестабильности свойств поверхности каналов микрочипа после плазменной обработки, о чем говорят наибольшие значения погрешностей. Наиболее эффективным методом модификации микрочипов с точки зрения снижения значения μ_{EO} оказалась обработка раствором Kolliphor. Именно этот метод был выбран для модификации микрочипов с целью проведения дальнейших экспериментов по их тестированию при разделении смеси олигонуклеотидов.

Таблица 1

Изменение величины электроосмотической подвижности буферного раствора в каналах МФЧ в зависимости от способа обработки

№ п/п	Чип № 1 (O ₂ 6 мин)	Чип № 2 (O ₂ 6 мин)	Чип № 3 (O ₂ 6 мин)	Чип № 1 (1 % ПВС)	Чип № 3 (1 % ПВС)	Чип № 4 (необр.)	Чип № 6 (3 % Kolliphor)	Чип № 7 (3 % Kolliphor)
Средн. ±СКО, см ² /(В*с)	4,6±0,4 x10 ⁻⁴	4,1±0,6 x10 ⁻⁴	3,7±0,5 x10 ⁻⁴	2,3±0,2 x10 ⁻⁴	2,1±0,1 x10 ⁻⁴	3,0±0, x10 ⁻⁴	1,8±0,1 x10 ⁻⁴	2,4±0,1 x10 ⁻⁴
КВ	8,6 %	14,9 %	12,1 %	8,9 %	5,6 %	7,5 %	4,1 %	4,0 %

Для электрофореза на микрочипах в качестве анализируемой пробы была выбрана смесь олигонуклеотидов (полиаденилатов) с длиной цепи 10, 20, 30, 40 и 50 нуклеотидов с флуоресцентной меткой. Электрофорез проводился на микрофлюидной аналитической системе МФАС-01 с детектором лазер-индуцированной флуоресценции (длина волны возбуждения 473 нм, регистрации – 510–530 нм). Напряжение электрофореза составило 1500 В. В качестве буферного раствора использовался 6 % раствор полидиметилакриламида с добавлением 7М мочевины. Результаты разделения исследуемой пробы приведены на рис. 4. Зависимости нормированы относительно максимального значения интенсивности флуоресценции.

Согласно полученным зависимостям можно оценить время, необходимое для проведения электрофореза фрагментов ДНК. Для необработанного микрочипа оно составило ~275 с, тогда как для обработанного раствором Kolliphor – ~220 с. Таким образом, уменьшение величины ЭОП привело к сокращению времени анализа. Дальнейшая оптимизация методов обработки позволит снизить время анализа пробы, что приведет к улучшению экспрессности определения биомолекул.

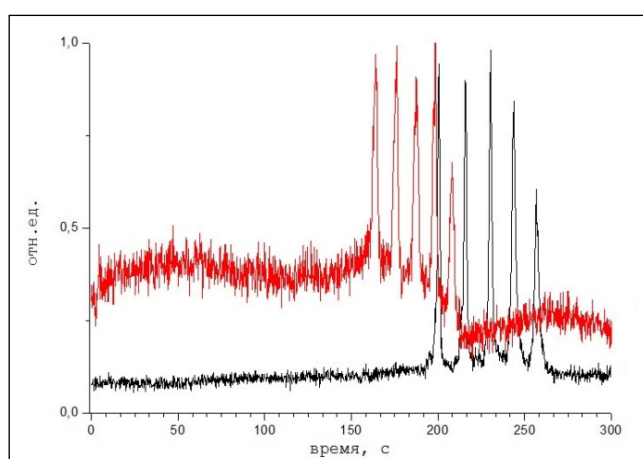


Рис. 4. Электрофореграмма разделения смеси олигонуклеотидов: черная – для необработанного МФЧ, красная – для обработанного раствором Kolliphor

Заключение

Возможность оперативного получения экспериментальных образцов МФЧ для электрофоретического разделения пробы с заданной топологией в условиях

исследовательских лабораторий позволяет разработать чрезвычайно важные методики экспресс-анализа биологических проб, ориентированные, в частности, на медицинскую диагностику социально-значимых заболеваний (выявление вирусных и бактериальных инфекций, диагностика гепатита, СПИДа, туберкулеза, онкологических заболеваний и т. д.).

Основными требованиями при проведении подобных анализов являются: высокая чувствительность, малый расход реагентов, высокая скорость обнаружения, доступность и сравнительно низкая стоимость. Так как аналитические характеристики метода зачастую определяются параметрами устройства, в котором осуществляется постановка анализа, то эти параметры должны быть выдержаны с высокой точностью и обладать воспроизводимостью. Поэтому создание новых прецизионных топологий и конструкций микрочипов, технологий для устойчивой модификации и обработки поверхности рабочих каналов позволит получить устройство – МФЧ с заданными стабильными характеристиками.

В работе показана принципиальная возможность изготовления методами «быстрого» прототипирования экспериментальных образцов стекляннопolyмерных микрофлюидных устройств для электрофоретического разделения биомолекул, подтвержденная экспериментальными данными, полученными при разделении смеси олигонуклеотидов на микрочипе. Исследованы физико-химические методы и условия обработки рабочих поверхностей МФЧ с целью получения поверхности с требуемыми стабильными свойствами и возможностью управления значением электроосмотической подвижности.

Результаты данной работы могут быть использованы при создании современных аналитических и технологических систем на микрофлюидной платформе и разработке новых методик экспресс-анализа медицинских проб, пищевых продуктов, лекарственных средств, объектов окружающей среды и т. д. Такие микрофлюидные устройства предназначены для широкого применения в химических, медицинских, биологических и экологических исследованиях, а также могут быть основой для систем оперативной диагностики на месте забора пробы (point of care). Следует отметить, что предлагаемый подход для изготовления МФЧ может быть использован в студенческих лабораториях в процессе выполнения лабораторных работ по изучению микрогидродинамики (микрофлюидики) или методов физико-химического анализа жидких проб (методы капиллярного электрофореза на микрочипе).

Автор выражает благодарность научному сотруднику лаборатории Информационно-измерительных био- и хемосенсорных микросистем (ИАП РАН) Г.Е. Рудницкой за помощь в проведении исследований по тестированию МФЧ.

Работа выполнена при поддержке Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 9 «Создание и совершенствование методов химического анализа и исследования структуры веществ и материалов» (проект «Микрофлюидные чипы для анализа биомолекул методами электрофореза»).

Публикации

1. Рудницкая Г.Е., Лукашенко Т.А., Посмитная Я.С., Тупик А.Н., Евстратов А.А. Физико-химические методы модификации поверхности полиметилметакрилата для микрофлюидных чипов // Научное приборостроение. 2014. Т. 24. № 3. С. 22–31.
2. Posmitnaya Y.S., Evstrapov A.A., Rudnitskaya G.E., Lukashenko T.A. Investigation of the effect of PDMS processing techniques on the surface morphology, optical properties and wettability // 2014 EMBL Conference Series Microfluidics. P. 142.
3. Posmitnaya Y.S., Evstrapov A.A., Rudnitskaya G.E., Lukashenko T.A. Creation and inspection of functional layers in polydimethylsiloxane microfluidic devices // 2014 Sino-Russian Young Scientist Forum and Symposium on Advanced Materials and Processing Technology. Abstracts. 2014. P. 96–97.

Литература

1. Paegel B.M., Blazej R.G., Mathies R.A. Microfluidic devices for DNA sequencing: sample preparation and electrophoretic analysis // *Current Opinion in Biotechnology*. 2003. Vol. 14. No 1. P. 42–50.
2. Magargle R., Hoburg J.F., Mukherjee T. An injector component model for complete microfluidic electrokinetic separation system // *Technical Proceedings of the 2004 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show*. 2004. Vol. 1. P. 77–80.
3. Kim P., Kwon K.W., Park M.C. et al. Soft lithography for microfluidics: a review // *BioChip Journal*. 2008. Vol. 2. No 1. P. 1–11.
4. Huang X., Gordon M.J., Zare R.N. Current-monitoring method for measuring the electroosmotic flow rate in capillary zone electrophoresis // *Analytical Chemistry*. 1988. Vol. 60. No 17. P. 1837–1838.



Сергеев Дмитрий Сергеевич

Факультет точной механики и технологий

Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии

E-mail: dmt.sergeev@gmail.com

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д.С. Сергеев

Научный руководитель – профессор А.В. Федоров

Цель работы – повышение качества паяных соединений жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) за счет повышения достоверности контроля. Для достижения цели необходимо решить ряд задач, одной из которой является анализ возможных схем проведения контроля и последующая разработка алгоритма контроля. Результаты решения данной задачи представлены в настоящем отчете.

Для контроля качества сложного изделия в автоматизированном режиме необходимо рассмотреть возможные схемы проведения контроля. Предлагаются следующие варианты: схема контроля «по ребру», «диаметру» и «спирали». Рассмотрим их более подробно. Схема контроля «по ребру» заключается в движении датчика вдоль контролируемого ребра, после чего он перемещается на следующее и далее до тех пор, пока не будут проконтролированы все ребра. Схема контроля «по диаметру» заключается в движении датчика по диаметру сопла путем поворота его на угол равный 360° . Контроль осуществляется до тех пор, пока не будет просканировано все сопло. В третьем варианте контроль выполняется по схеме, которая является синтезом двух предыдущих. Для выбора оптимальной варианта необходимо разработать критерии оценки предложенных схем.

Критерии выбора оптимальной схемы контроля:

- обеспечение устойчивого акустического контакта.
- получение наиболее информативного сигнала.
- простота конструкции.
- сведение полной погрешности контроля качества паяных соединений к минимуму.
- возможность возвращения в дефектную область.

Предложенным критериям удовлетворяет схема контроля ЖРД «по диаметру» (рис. 1).

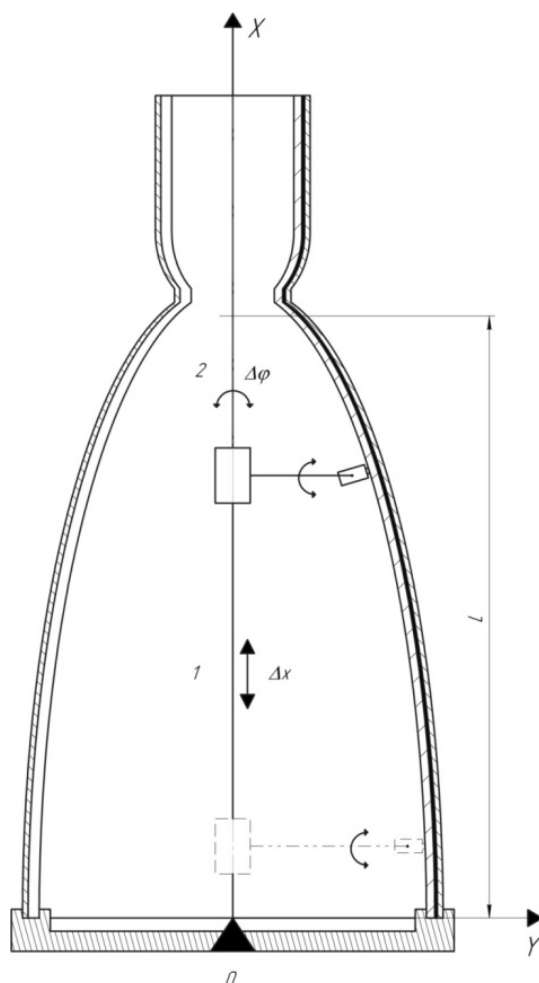


Рис. 1. Схема контроля двигателей ЖРД

Алгоритм контроля качества паяных соединений по схеме «по диаметру» представлен на рис. 2 и состоит из следующих операций.

1. Поиск нулевого ребра.
2. Движение датчика по заданному диаметру d_1 на угол равный 360° .
3. Перемещение датчика вдоль оси X на шаг равный ширине акустического пятна (примерно 0,8 мм).
4. Движение датчика по диаметру d_2 на угол равный 360° .
5. Повторить пункт 3.
6. Движение датчика по диаметру d_n на угол равный 360° .
7. Повторить пункт 3.

На основе предложенного алгоритма разработана программа управления движением лазерно-ультразвукового датчика по заданной траектории (рис. 3). Автоматизированный контроль качества паяных соединений проводился на вырезках двигателя РД-191 (рис. 4).

Образец контроля имеет сложную геометрическую форму и имеет фрезерованные пазы, расположенные по всей длине образца.

На полученных в результате автоматизированного контроля изображениях (рис. 5) периодически появляется и пропадает темная полоса, свидетельствующая о наличии фрезерованного паза между ребрами. Отсутствие ее на глубине 2,3 мм свидетельствует об отсутствии дефекта в зоне пайки ребра, а наличие – о присутствии дефекта.

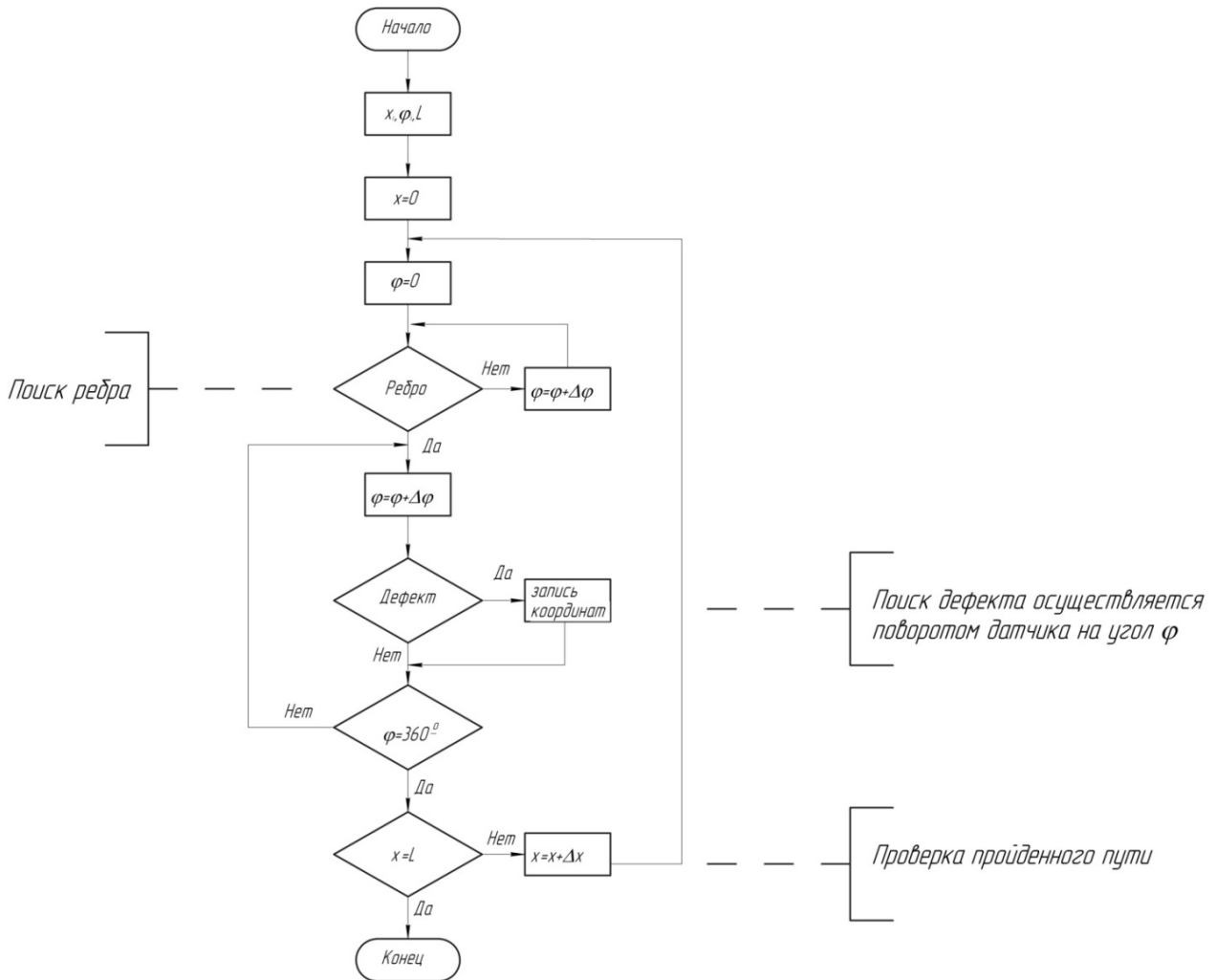


Рис. 2. Алгоритм контроля двигателей ЖРД

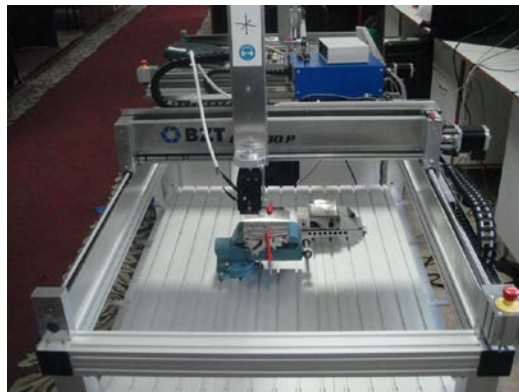
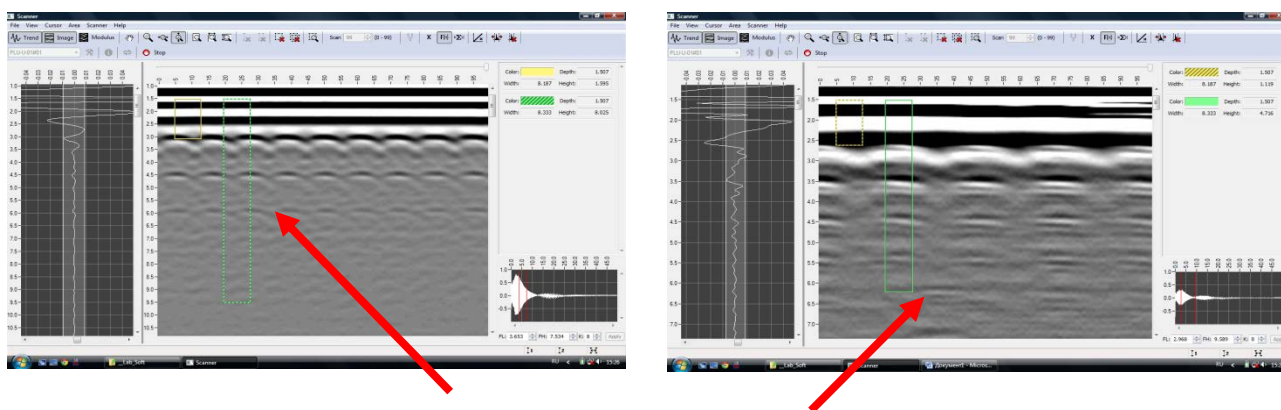


Рис. 3. Общий вид автоматизированной установки контроля качества паяных соединений изделий РКТ



Рис. 4. Общий вид образца (вырезка двигателя РД – 191)



а

б

Рис. 5. Результаты контроля: а – бездефектная область; б – дефект

Заключение

Применение разработанного алгоритма на автоматизированной установке позволяет обеспечить сплошной контроль качества объекта и выявление дефектов (неспаев, непропаев, отрывов) паяных соединений на вырезках двигателя РД191.

К наиболее значимым результатам работы стоит отнести анализ схем и разработку алгоритма контроля качества паяных соединений ЖРД, а также проведение его апробации.

Публикации

1. Сергеев Д.С., Астрединова Н.В. Разработка алгоритма проведения контроля качества паяных соединений изделий ракетно-космической техники // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 168–169.
2. Н.В. Астрединова, Д.С. Разработка научно-методологического подхода в контроле качества паяных соединений тонкостенных изделий ЖРД // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: в 2 т./ Томский политехнический университет. Т. 1. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2014. С. 146–149.
3. Сергеев Д.С., Астрединова Н.В. Анализ оптимальной схемы проведения контроля качества изделий ракетно-космической техники // Альманах научных работ молодых ученых XLIII научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО. СПб., 2014. С. 353–355.
4. Астрединова Н.В., Сергеев Д.С., Баринев А.В. Лазерно-ультразвуковая дефектоскопия как перспективный метод контроля качества тонкостенных паяных соединений элементов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 3 С. 83–88.
5. Сергеев Д.С., Астрединова Н.В. Автоматизированный контроль качества паяных соединений изделий ракетно-космической техники // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 1 (63). С. 51-52.

Литература

1. Быченко В.А., Кинжагулов И.Ю. Лазерно-ультразвуковой контроль тонкостенных паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 7. С. 50–54.
2. Карабутов А.А., Матросов М.П., Подымова Н.Б. Термооптический генератор широкополосных импульсов сдвиговых волн // Акустический журнал. 1993. Т. 39. № 2. С. 373–375.



Сергеева Елена Игоревна
Естественнонаучный факультет
Кафедра высшей математики
E-mail: srgv.lena@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА СРЕДНИХ В.А. СТЕКЛОВА ПРИ РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ ПО ИЗВЕСТНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ В УЗЛАХ РАВНОМЕРНОЙ СЕТКИ

Е.И. Сергеева

Научный руководитель – доцент Г.Ю. Пуеров

Постановка задачи

В разных областях науки и техники часто встречается следующая задача. По набору известных данных в произвольных точках (узлах) заданной области, которые могут располагаться как регулярно, так и произвольно, требуется получить функцию, восстанавливающую данные в других точках этой области. При этом построенная функция должна удовлетворять некоторым условиям гладкости. Например, имеются приборы, находящиеся в фиксированных точках двумерной области (узлах), одновременно снимающие значения параметров быстропротекающего процесса. Требуется определить значения параметров в других точках области. При этом вычисления должны производиться в условиях реального времени.

Цели и задачи проекта

Разработка и математическое обоснование ряда вычислительно-эффективных алгоритмов для решения задачи восстановления данных, а также их компьютерное моделирование.

Основные результаты

В ходе выполнения научно-исследовательской работы был использован хорошо разработанный аппарат классической теории аппроксимации [1–5]. В частности, для решения поставленной задачи применен аппарат средних В. А. Стеклова. Данная работа является продолжением проекта, описанного в работе [6].

В представленной статье развиваются методы, предложенные в работах [3, 7–12]. Их особенность в том, что все операции удастся осуществить в конечной форме, не прибегая к приближенным методам, что важно при их программной реализации.

Для операции сглаживания, которая является составной частью при решении задачи восстановления данных, применяются алгоритмы, предложенные в работах [13, 14]. Оценка погрешностей выполнена в работах [15, 16].

Рассмотрим подробнее решение задачи восстановления данных по известным значениям в узлах равномерной сетки со сглаживанием на базе обобщенных средних В.А. Стеклова, предложенное в работах [17, 18].

Пусть задан отрезок $[a, b]$, который разбит на равные части с шагом h . Узлы равномерной сетки задаются следующим образом:

$$\{a^{(k)} = a + kh\},$$

где $k = 0, \dots, K - 1$.

В точках $a^{(k)}$ известны значения функции f . Требуется найти гладкую на $[a, b]$ функцию g «хорошо» аппроксимирующую f .

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

На базе подхода, предложенного в работах [3, 7–12] разработан следующий алгоритм восстановления функции f по ее известным значениям. Пусть $r \in \mathbf{N}$, $x \in [a, b]$. Отрезок $[a, b]$ разбит на отрезки I_p , где $p = 0, \dots, P-1$. Тогда:

1. На каждом отрезке I_p строится аппроксимирующая функция:

$$g_p(x) = \begin{cases} l_r(x), & \text{если } x \in I_p, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $l_r(x)$ — интерполяционный полином степени r ,

$$g(x) = \sum_{p=0}^{P-1} g_p(x).$$

2. Для сглаживания предлагается использовать следующее обобщение средних В.А. Стеклова [5]:

$$R_{\alpha,r}(g, x) = \sum_{i=1}^r (-1)^i C_r^i S_{\frac{2\alpha i}{r}, r}(g, x),$$

где $S_{t,r}(g, x)$ средние В.А. Стеклова порядка r с шагом t функции g .

Области возможного использования результатов

Задача восстановления данных по известным значениям в узлах некоторой сетки имеет большое практическое значение. Она используется в таких приложениях как моделирование и построение различных геометрических объектов, численное решение уравнений математической физики, во многих других областях математики, геологии, биологии, обработки сигналов и т. д.

Рассмотрим подробнее некоторые из них.

- Восстановление поврежденных изображений в том случае, если часть данных изображения утеряна.

- Построение поверхностей и автоматизированное геометрическое проектирование. В этом случае необходимо обеспечить такое представление кривых и поверхностей, с которыми можно легко работать на компьютере, то есть удобно хранить и отображать на экране ЭВМ.

- Промышленное проектирование. Обычно проектировщик имеет описание кабины автомобиля, корпуса судна, фюзеляжа самолета, сложных деталей двигателей и т. д. в виде дискретного набора точек. Чтобы получить требуемый объект, нужно описать эти точки как лежащие на некоторой кривой или поверхности [19].

Заключение

В ходе выполнения проекта был предложен ряд алгоритмов восстановления функций по известным значениям в узлах равномерной сетки со сглаживанием на базе обобщенных средних В.А. Стеклова и выполнено их компьютерное моделирование.

Публикации

1. Пуеров Г.Ю., Сергеева Е.И. Обобщенные средние В.А. Стеклова в задаче восстановления данных по значениям в узлах равномерной сетки. Труды XI всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., «Наука», 2012. С. 318–319.
2. Пуеров Г.Ю., Сергеева Е.И. Оценка отклонений обобщенных средних В.А. Стеклова гладких функций двух переменных. Материалы международной научной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики». Тула, 2012. С. 67–69.
3. Сергеева Е.И. Алгоритмы сглаживания на базе обобщенных средних В.А. Стеклова при восстановлении функций по известным значениям в узлах // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. С. 285–286.

4. Puerov G.Yu., Sergeeva E.I. Estimate for Deviations of Generalized Steklov Averages for Functions of two Variables // Journal of Mathematical Sciences Vol. 189 № 3, 2013. P 536–543.
5. Сергеева Е.И. Алгоритмы восстановления функций по известным значениям в узлах равномерной сетки с применением аппарата средних В.А. Стеклова // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. – СПб.: НИУ ИТМО, 2014. С. 284–285.
6. Пуеров Г.Ю., Сергеева Е.И. Восстановление данных по известным значениям в узлах равномерной сетки с применением средних В.А. Стеклова для сглаживания. Труды XII всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., «Нестор-История», 2014. С. 590–591.
7. Сергеева Е.И. Обобщенные средние В.А. Стеклова в задаче восстановления данных по известным значениям в узлах. Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под ред. В.О. Никифорова, СПб.: Университет ИТМО, 2014. С. 240–246.

Литература

1. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолли Дж. Теория сплайнов и ее приложения. – М., 1972.
2. Ахиезер Н.И. Лекции по теории аппроксимации. – М., 1965.
3. Жук В.В. Методические указания к курсу «Теория аппроксимации функций и ее приложения». Часть 2. Санкт-Петербургский ун-т. 1993. 41 с.
4. Жук В.В. Лекции по теории аппроксимации. – СПб., 2008.
5. Жук В.В., Кузютин В.Ф. Аппроксимация функций и численное интегрирование. – СПб., 1995.
6. Сергеева Е.И. Обобщенные средние В.А. Стеклова в задаче восстановления данных по известным значениям в узлах. Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под ред. В.О. Никифорова, СПб.: Университет ИТМО, 2014. С. 240–246.
7. Dodonov N.Yu., Zhuk V.V. On Uniform Approximation In R^2 Of Continuous Functions Of Two Variables With Bounded Variation In The Sense Of Hardy // Journal of Mathematical Sciences, Vol. 122, № 3, 2004. P 3184 – 3211.
8. Dodonov N.Yu., Zhuk V.V. Uniform Approximation Of Nonperiodic Functions Defined On The Entire Axis // Journal of Mathematical Sciences, Vol. 124, №. 3, 2004. P 4968–4979.
9. Dodonov N.Yu. Approximation Of Functions In The Spaces $L_p(R)$ By Means Of Shifts And Contractions Of One Function // Journal of Mathematical Sciences, Vol. 128, №. 5, 2005. P 3214 – 3231.
10. Dodonov N.Yu. On Uniform Approximation Of Abstract Functions By Aggregates Of Summatory Type On A Rectangle // Journal of Mathematical Sciences, Vol. 142, №. 1, 2007. P 1788–1805.
11. Dodonov N.Yu. On Uniform Approximation Of Abstract Functions On Convex Polygons // Journal of Mathematical Sciences, Vol. 144, №. 6, 2007. P 4592–4611.
12. Масальских А.В. Использование агрегатов приближения сумматорного типа при передискретизации цифровых изображений. Материалы международной научной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики». Тула, 2013. С. 67–69.
13. Пуеров Г.Ю., Сергеева Е.И. Обобщенные средние В.А. Стеклова в задаче восстановления данных по значениям в узлах равномерной сетки. Труды XI всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., «Наука», 2012. С. 318–319.

14. Сергеева Е.И. Алгоритмы сглаживания на базе обобщенных средних В.А. Стеклова при восстановлении функций по известным значениям в узлах // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. С. 285–286.
15. Пуеров Г.Ю., Сергеева Е.И. Оценка отклонений обобщенных средних В.А. Стеклова гладких функций двух переменных. Материалы международной научной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики». Тула, 2012. С. 67–69.
16. Puerov G.Yu., Sergeeva E.I. Estimate for Deviations of Generalized Steklov Averages for Functions of two Variables // Journal of Mathematical Sciences Vol. 189 № 3, 2013. P 536–543.
17. Пуеров Г.Ю., Сергеева Е.И. Восстановление данных по известным значениям в узлах равномерной сетки с применением средних В.А. Стеклова для сглаживания. Труды XII всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб, «Нестор-История», 2014. С. 590–591.
18. Сергеева Е.И. Алгоритмы восстановления функций по известным значениям в узлах равномерной сетки с применением аппарата средних В.А. Стеклова // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. – СПб: НИУ ИТМО, 2014. С. 284–285.
19. Квасов Б.И. Методы изометрической аппроксимации сплайнами. – М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. – 416 с.



Сергушичев Алексей Александрович
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: alserg@rain.ifmo.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ ГЕНОМА С ДОКАЗУЕМЫМ КАЧЕСТВОМ

А.А. Сергушичев

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

Введение

Современная биология и медицина требуют знания генома живых организмов. Таким образом возникает задача определения этой последовательности. В настоящее время она решается в несколько этапов. Сначала получают «чтения» генома – небольшие его фрагменты, для которых известна последовательность нуклеотидов, но неизвестна позиция в геноме, откуда они были взяты. Затем происходит сборка генома, то есть получение длинных его фрагментов, состоящих из перекрывающихся чтений. В идеальном варианте этот этап должен давать по одному длинному фрагменту на каждую хромосому. Однако обычно этого достичь не удастся, поэтому добавляется этап финишинга – доработки последовательности с помощью дополнительного секвенирования и анализа.

Для задачи сборки генома существует множество математических формулировок, многие из которых NP-трудны [1]. В связи с этим программы для сборки являются сложными и содержат много эвристик. Это, с одной стороны, позволяет получать приемлемые результаты на практике, с другой – качество результата может непредсказуемо изменяться от сборки к сборке. Таким образом, возникает задача разработки метода сборки, для которого можно было бы гарантировать качество результата заранее, до непосредственной сборки.

Постановка задачи

В работе рассматривается упрощенная задача сборки: восстановление фрагментов генома (квазиконтигов), соответствующих парным чтениям путем определения последовательности между ними. Целью настоящей работы является создание такого метода решения этой задачи, чтобы можно было доказать качество получающегося результата.

В работе [2] предложен метод сборки квазиконтигов из парных чтений, полученных с помощью секвенаторов компании *Illumina*, в которых практически отсутствуют ошибки вставки и удаления. В связи с тем, что в настоящее время появляются новые технологии секвенирования, в том числе и с ошибками вставки и удаления, возникает задача учета этого типа ошибок.

Таким образом, в данной работе были поставлены следующие задачи:

- разработать метрику для оценки схожести нуклеотидных последовательностей;
- разработать алгоритм сборки квазиконтигов из парных чтений, содержащих ошибки вставки и удаления;
- доказать качество получающегося результата;
- реализовать алгоритм на одном из языков программирования;
- провести экспериментальное исследование этого алгоритма.

Предлагаемый метод

Предлагаемый метод сборки квазиконтигов использует взвешенный граф де Брёйна [3], построенный на чтениях. Вершинами этого графа являются k -меры, ребрами – p -меры, $p = k+1$.

Для каждой пары чтений в графе де Брёйна находится множество вершин и ребер, через которые проходит хотя бы один путь, соединяющий эти два чтения, подходящий по длине под априорные границы на расстояние между чтениями. В получившемся подграфе выделяется подграф с большим весом так, что все возможные пути, соединяющие парные чтения совпадают с каким-нибудь путем по оставшимся ребрам с точностью до небольшого числа ошибок замены, вставки или удаления. Если после этого граф состоит из единственного пути, то последовательность нуклеотидов на этом пути выводится как квазиконтиг.

Алгоритм поиска путей выполняет поиск всех ребер, через которые проходит хотя бы один путь от вершины (k -мера) v_{start} до вершины v_{end} длины не больше $L_{max}-k$. Этот алгоритм близок к предложенному ранее в работе [2].

Предлагаемый алгоритм состоит из нескольких шагов. Сначала строятся два дерева обхода в ширину B_1 и B_2 от вершин v_{start} (по прямым ребрам) и v_{end} (по обратным ребрам) глубинами l_1 и l_2 соответственно, для некоторых l_1 и l_2 таких, что $l_1+l_2 = L_{max}-k$. Затем вершины с одинаковыми метками объединяются. В полученном графе оставляют только те вершины, которые достижимы одновременно и из вершины v_{start} , и из вершины v_{end} по прямым и обратным ребрам соответственно. Таким образом, если для вершины u существует путь между v_{start} и v_{end} длиной не больше $L_{max}-k$, то, во-первых, каждая из вершин на этом пути попадет хотя бы в одно из деревьев B_1 или B_2 и, во-вторых, хотя бы одна из этих вершин попадет в оба дерева. Из этого следует, что все вершины и ребра на этом пути будут присутствовать в полученном графе.

Обходы в ширину выполняются попеременно. На каждой итерации делается в шаг либо в первом, либо во втором обходе. То, в каком обходе делать шаг, зависит от размера текущего слоя: выбирается тот обход, в котором размер текущего слоя меньше.

Два пути называются похожими, если можно выбрать такой набор простых исправлений (замены, вставки или удаления символа), что на любой k -мер этих путей приходилось не больше заданного числа исправлений. В отличие от простого ограничения на расстояние Левенштейна между путями, такой выбор позволяет, во-первых, избежать концентрирования ошибок в одной части и, во-вторых, сравнивать части путей независимо. Рассмотрим пример сжатого графа де Брёйна, изображенный на рис. 1. Пусть путь

V отличается от пути C на один нуклеотид, а E сильно отличается от F . Рассмотрим использование расстояние Левенштейна для определения похожести путей. По этому определению пути ABD и ACD являются похожими, и, следовательно, один из них можно удалить, практически не теряя информации. С другой стороны, пути $ABDEG$ и $ACDFG$ не являются похожими, и все ребра несут информацию, поэтому удалять их нельзя. Таким образом, при использовании расстояния Левенштейна для определения похожести может возникнуть противоречие. Если же рассматривать предложенный метод определения похожести, то легко четко определить, что пути $ABDEG$ и $ACDFG$ отличаются только из-за непохожести путей E и F . В этом случае путь C можно будет удалить, не теряя информации.

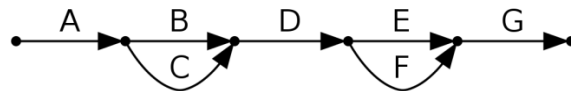


Рис. 1. Пример сжатого графа де Брёйна

После того, как был получен граф, содержащий все возможные пути между вершинами v_{start} и v_{end} , необходимо убрать ошибки и небольшие реальные различия в последовательностях. Иными словами, требуется выбрать такой подграф, чтобы любой путь в исходном графе был похож на какой-нибудь из путей в этом подграфе. При этом требуется, с одной стороны, минимизировать число оставшихся ребер, с другой – они должны быть достаточно большого веса.

Эта задача решается с помощью эвристического алгоритма в несколько итераций. На каждой из них некоторые ребра помечаются и остаются в окончательном графе, а некоторые – удаляются. Так на каждой итерации выбирается путь между вершинами v_{start} и v_{end} максимального веса, содержащий хотя бы одно непомеченное ребро. Все ребра на этом пути помечаются. Затем находят непомеченные ребра, все пути по которым похожи на какой-нибудь путь по помеченным ребрам, и они удаляются. На рис. 2 показан пример работы этого алгоритма.

Для того чтобы найти ребра, все пути через которые похожи на какой-нибудь путь по помеченным ребрам, вводится булева функция $anyPathFromXHaveSimilarGoodPathFromY(x, y, doneErrors)$. Она возвращает true, только если любой путь, начинающийся с x (вершины или ребра), похож на какой-нибудь путь по помеченным ребрам, начинающийся с y (вершины или ребра), при том, что уже сделаны ошибки, позиции которых описаны в $doneErrors$. Далее в данном разделе для краткости будем обозначать эту функцию как f . Описание ошибок $doneErrors$ – это список относительных позиций ошибок, которые удалены от текущей позиции не больше чем на k .

В самом начале функции f выполняется проверка на число ошибок в $doneErrors$. Если оно не превышает заданного порога (на практике используется значение около пяти), то возвращается значение false. Затем отсекается второй граничный случай: если x и y совпадают с v_{end} , возвращается значение true.

Теперь рассмотрим общий случай, когда и x , и y – это вершины, и они имеют исходящие ребра (для y – помеченные). Проверяется, что для каждого исходящего ребра ex из x верно, что любой путь, начинающийся с ex , похож на какой-нибудь путь по помеченным ребрам, начинающийся с y , причем уже сделаны ошибки $doneErrors$, то есть верно $f(ex, y, doneErrors)$. После того, как было выбрано ребро ex , с которого начинается путь из x , проверяется, что хотя бы для одного ребра ey из y верно $f(ex, ey, doneErrors)$. Заметим, что этот переход не точный: в том смысле, что возможна ситуация, когда одному из путей, начинающихся с ex , будет соответствовать путь, начинающийся с $ey1$, а другому – с $ey2$.

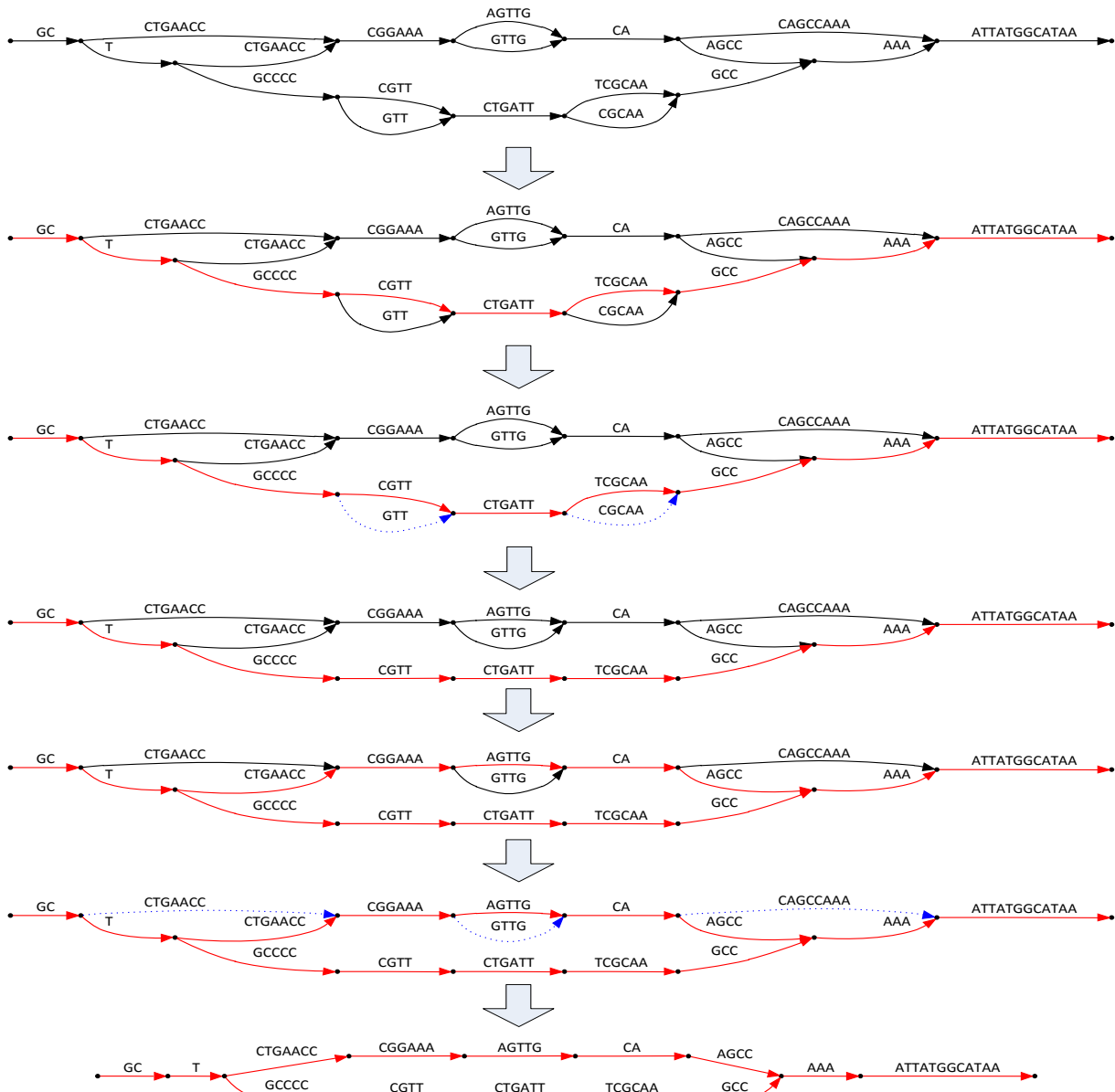


Рис.2. Пример работы алгоритма нахождения консенсуса

В случае, когда зафиксированы ребра ex и ey , возможны четыре варианта:

- нуклеотиды на этих ребрах совпадают и верно $f(ex.to, ey.to, doneErrors.appendMatch())$, где $e.to$ означает конечную вершину ребра e , а $doneErrors.appendMatch()$ возвращает новое описание ошибок со сдвигом номеров всех ошибок в $doneErrors$ без добавления новой ошибки;
- нуклеотиды на этих ребрах не совпадают и верно $f(ex.to, ey.to, doneErrors.appendError())$, где $doneErrors.appendError()$ означает сдвиг номеров всех ошибок в $doneErrors$ с добавлением новой, с относительным сдвигом равным нулю;
- верно $f(ex.to, ey, doneErrors.appendError())$;
- верно $f(ex, ey.to, doneErrors.appendError())$.

Первый вариант соответствует отсутствию ошибки в этой позиции, второй – ошибке замены, два последних – ошибкам вставки и удаления. Если хотя бы один из этих вариантов выполняется, то утверждение проверяемое функцией оказывается верным и возвращается значение `true`, в противном случае – возвращается `false`.

На каждом рекурсивном вызове выполняется продвижение вперед как минимум от одной вершины. Так как рассматриваются только ребра и вершины, лежащие на пути от v_{start}

до v_{end} , то эта функция завершится за конечное время либо из-за того, что x и y совпадают с v_{end} , либо из-за того, что число ошибок превысит порог.

Для того чтобы удалить лишние ребра описанная функция вызывается в вершинах, в которых есть как помеченные, так и непомеченные ребра. Для каждого непомеченного ребра ex вычисляется значение функции $f(ex, ex.from)$. Если она вернула true, то это означает, что через ребро ex не проходит «интересных» путей, следовательно его можно удалить.

О качестве получающихся квазиконтигов можно сделать следующий вывод. Зафиксируем k . Пусть для случайной пары чтений:

- вероятность того, что первый k -мер первого чтения и последний k -мер второго содержат ошибки, не больше ε_1 ;
- вероятность того, что хотя бы один из геномных k -меров соответствующего этой паре чтений фрагмента покрыт меньше h раз, где h – порог на добавление в граф де Брёйна, не больше ε_2 ;
- вероятность того, что пара чтений является химерной, не больше ε_3 ;
- вероятность того, что длина исходного фрагмента больше чем L_{max} , не больше ε_4 .

Утверждение: при выполнении этих условий вероятность того, что для этой пары будет получен квазиконтиг и он будет непохож на соответствующую геномную последовательность, не превосходит ε , где $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4$.

Экспериментальные исследования

Предложенный алгоритм был реализован на языке программирования *Java* и был протестирован на двух наборах данных бактериальных геномов *E. Coli* и *P. Stutzeri*.

Геном *E. Coli* известен и имеет длину 4,6 млн нуклеотидов. Для тестирования предложенного метода была выбрана библиотека парных чтений *SRR001665*, полученная с помощью секвенатора компании *Illumina*. Длина чтений составляет 36 нуклеотидов, средний размер фрагмента – около 200, число чтений – 10 млн. Чтобы повысить точность анализа результатов сборки квазиконтигов, референсный геном *K-12 MG1655* был вручную модифицирован так, чтобы реальные различия между этим геномом и геномом, из которого была получена библиотека, не учитывались. Для этого было произведено несколько однонуклеотидных замен и несколько вставок повторяющихся фрагментов на основе анализа картирования чтений на геном. Получившийся геном доступен по адресу [4].

В эксперименте был проведен анализ качества квазиконтигов в зависимости от значения параметра k . Для этого для всех k из множества {17, 21, 25, 29, 33} была запущена сборка с ограничением на максимальный квазиконтиг 500 с использованием 4 Гб оперативной памяти. Результаты показали, что алгоритм выдает действительно качественные чтения.

Геном *P. Stutzeri* имеет длину около 5 млн нуклеотидов. Имелось три библиотеки чтений. Две библиотеки одиночных чтений: библиотека из 2,3 млн чтений со средней длиной чтения 100 и библиотека из 2,7 млн чтений со средней длиной чтения 200. Третья библиотека состояла из 2,1 млн парных чтений со средней длиной 80 нуклеотидов и средним размером вставки 2 тыс. нуклеотидов. Непарные чтения использовались только для построения графа де Брёйна.

Сборка квазиконтигов была запущена для k из {25, 29, 33, 37, 41, 45}. Она проводилась из неисправленных чтений всех библиотек. Так как нет хорошего референсного генома, результаты проверки качества квазиконтигов отсутствуют.

Квазиконтиги использовались для последующей сборки контигов с помощью метода *overlap-layout-consensus*. Было выполнено сравнение полученных таким образом контигов с контигами, полученными из исходных чтений с помощью коммерческой программы *CLC Genomics Workbench*, которая на настоящий момент является одной из лучших программ для сборки генома из чтений с ошибками вставки и удаления [5]. Результаты сравнения приведены в Таблице.

Таблица

Сравнение результатов по сборке генома *P. Stutzeri* с использованием предложенного метода и сборщиком CLC

	ITMO	CLC
Число контигов	390	1784
Суммарная длина	$4,80 \cdot 10^6$	$5,17 \cdot 10^6$
N50	$22,3 \cdot 10^3$	$18,7 \cdot 10^3$
Максимальный контиг	$74,9 \cdot 10^3$	$96,8 \cdot 10^3$

Заключение

В работе предложен метод учета парной информации для сборки геномов из чтений с ошибками вставки и удаления. Особенности предложенного метода являются наличие оценки на качество получаемых результатов и достаточно небольшое требование к оперативной памяти. Предложенный метод реализован на языке программирования *Java* и экспериментально протестирован. Полученные результаты по некоторым параметрам превосходят результаты других сборщиков генома.

Данный метод можно использовать для сборки геномов совместно с другими программами, реализующими сборку из одиночных чтений этапа. Этот метод также возможно расширить для задачи сборки генома целиком, сохраняя доказуемость качества получаемых контигов.

Публикации

Сергушичев А.А. Разработка метода восстановления фрагментов нуклеотидной последовательности по парным чтениям // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров и специалистов НИУ ИТМО. СПб., 2011. С. 15–17.

Литература

1. Medvedev P. et al. Computability of models for sequence assembly // Algorithms in Bioinformatics. 2007. Vol. 4645. P. 289–301.
2. Сергушичев А.А. Разработка метода восстановления фрагментов нуклеотидной последовательности по парным чтениям // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров и специалистов НИУ ИТМО. СПб., 2011. С. 15–17.
3. Pevzner P., Tang H., Waterman M. An Eulerian path approach to DNA fragment assembly // PNAS. 2001. Vol. 98 (17). P. 9748–9753.
4. coli_srr001665.fasta [Электронный ресурс] // Лаборатория «Алгоритмы сборки геномных последовательностей» [Офиц. сайт]. URL: http://genome.ifmo.ru/files/experiments/ecoli/coli_srr001665.fasta (дата обращения: 15.09.2014).
5. Loman N. First look at Ion Torrent data: De novo assembly [Electronic resource] // Pathogenes: Genes and Genomes [Blog]. URL: <http://pathogenomics.bham.ac.uk/blog/2011/05/first-look-at-ion-torrent-data-de-novo-assembly> (accessed: 15.09.2014).



Силакова Любовь Владимировна
Факультет экономики и экологического менеджмента
Кафедра экономики и финансов
E-mail: silakovalove@gmail.com

ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОЦЕНКИ СОЦИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ СТУДЕНТОВ ВУЗОВ

Л.В. Силакова

Научный руководитель – профессор Г.П. Петропавлова

Цель проекта – формирование механизма оценки социальной активности студентов через создание автоматизированной системы для учета и оценки добровольческой деятельности академического сообщества. Объектом исследования является процесс организации регулирования социальной активности студентов в период обучения в университете в условиях формирования инновационной экономики страны. В процессе исследования были решены задачи:

- выявления и анализа запросов современности в системе высшего образования;
- анализа теоретических основ социальной активности и методик ее оценки;
- выработки авторской методики для оценки социальной активности академической общественности;
- разработки организационной модели функционирования информационной системы на основе методики, предложенной автором.

С внедрением новых федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) началось построение новой образовательной парадигмы, базирующейся на «компетентностном подходе». Этот подход подразумевает, что для достижения (или подтверждения) квалификации специалист должен обладать сформированной системой не только профессиональных качеств (знания, умения, навыки, опыт – составляющие человеческого капитала), но и личностных (самостоятельность, инициативность, ответственность, креативность). По нашему мнению, эти качества формируются в период ранней взрослости, а именно в период обучения в университетах. Отсюда и наше выделение роли университетов как инкубаторов авангардной молодежи. Компетенции, которые необходимо формировать у студентов в сегодняшней реальности, являются все более четко определенными и быстро меняющимися. Одновременно запросы к качеству специалистов со стороны рынка труда повышаются, и этим, в том числе, объясняется наблюдающийся переко в спросе и предложении кадров.

Список существующих способов накопления компетенций в период обучения с точки зрения организации учебного процесса довольно широк: внедрение кредитно-модульной системы, асинхронного образования, введение проектных методов обучения, кейсов и симуляторов и т. п. Наиболее распространенными являются так называемые активные методы обучения (например программированного, проблемного и интерактивного обучения). Они предполагают использование системы методик, направленной на самостоятельное овладение студентами знаний в процессе их активной познавательной деятельности. В практике зарубежных университетов уже давно используются такие формы обучения, как «обучение действием» (action learning), заключающееся в усвоении знаний и их применении, а также «обучение через служение обществу» (service learning), призванное способствовать более глубокому усвоению знаний через деятельность на благо общества или социальную активность.

Сущностными характеристиками социальной активности являются: самодетерминированность (внутреннее, осознанное побуждение, обусловленное

сформированным образом «потребного будущего», значимого для личности), включенность в социальное взаимодействие (социальная продуктивная деятельность, общение, познание) и просоциальность (направленность на преобразование носителя активности и социума во благо общества и личности, следуя социальным нормам, законам и нравственным идеалам) [3]. Социальная активность студенческой молодежи является разновидностью добровольческой деятельности.

После проведения в Сочи в 2014 г. Зимних Олимпийских игр, в которых приняло участие более 25 тыс. волонтеров, наблюдается активизация добровольческого движения. Мы считаем, что созданные Центры подготовки волонтеров в 26 университетах страны призваны организовать и направить добровольческую деятельность авангардной молодежи, передав свой опыт («Наследие»). Волонтерские центры в Университете ИТМО и МГГУ им. М.А. Шолохова являются примерами уже функционирующих организаций в вузах [1]. Однако на данный момент практика оценки (в том числе и экономической) добровольческой деятельности в академической среде как таковой не наблюдается. Известно, что целью добровольца не является получение дохода, однако его труд приносит материальный или нематериальный результат, который целесообразно оценить. Его деятельность оказывает влияние на непосредственных благополучателей, на самого добровольца, на организации, через которые он привлекался к работе, и в целом на качество жизни общества. Однако в настоящий момент отсутствует систематическая форма учета этих эффектов, но существует фрагментарный опыт оценки некоторых из них в ограниченном ряде стран. Например, регулярные обследования добровольчества проводят статистические службы Австралии, Германии, Канады, Нидерландов, Норвегии, США и Швейцарии [2].

Вопросы организации учета и оценки социальной активности в университетах являются крайне актуальными в условиях формирования инновационной экономики нашей страны. Во всем мире высшее профессиональное образование (ВПО) является важнейшим источником рождения инноваций. Кроме того, актуальность проекта полностью отвечает основным положениям Концепции социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 г., утвержденной распоряжением Правительства РФ от 17 ноября 2008 г. № 1662-р; подпрограмме 4 «Вовлечение молодежи в социальную практику» государственной программы РФ «Развитие образования» на 2013–2020 гг.; плану мероприятий по реализации программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО 2013–2020 гг. (Программа 5 в 100); программе развития Университета ИТМО до 2018 г. в части блоков № 3 и 4 – «Совершенствование образовательной системы и кадровой политики Университета»; и решению Ученого совета Университета ИТМО от 25 марта 2014 г. о разработке сертификатов для студентов в рамках концепции развития социально-гуманитарного направления.

В ходе реализации проекта была разработана методика учета и оценки социальной активности, на основе которой создан информационный ресурс с программным модулем, встроенным в Интранет Университета ИТМО. Централизованный учет социальной активности производится в процессе функционирования сайта с помощью базы данных, которая накапливает сведения об участии студентов в различных проектах и мероприятиях в качестве добровольца. Пользователи сайта регистрируются в качестве добровольца или организатора мероприятия, после чего добровольцы получают возможность участвовать в интересных им мероприятиях, а организаторы – размещать заявки на помощь добровольцев и оценивать их работу по итогам мероприятия в количественной (время) и качественной (комментарий, отзыв) формах. Разработанная автором для целей учета форма, названная «Информационный табель мониторинга и оценки добровольца («ИТМО-Да!»), служит основой начисления рейтинга социальной активности.

Таким образом в университете формируется база данных социально активных студентов и количественная оценка времени, затраченного на социально полезную деятельность. Эти данные определяют количество человеко-часов добровольческой деятельности, которое, в свою очередь, является основой для экономической оценки

социальной активности, то есть ее экономическом эффекте, расчет которого также предполагается созданной системой.

Были проанализированы российская и зарубежная практики оценки экономического эффекта добровольческой деятельности, исходя из стоимости времени, затраченного на выполнение работ. Ниже перечислены наиболее общие подходы:

– подход альтернативных издержек (экономическая ценность труда оценивается как стоимость часа работы добровольца, исходя из его средней заработной платы на основном месте работы);

– подход замещения стоимости или сравнительный (оценивается стоимость часа добровольческой работы, в соответствии со средней оплатой за подобный вид деятельности наемному работнику) [4];

– затратный подход (оценивается исходя из минимального размера оплаты труда).

Выработанная методика предполагает использование третьего метода с введением повышающих коэффициентов, в зависимости от трудоемкости работ добровольца. Научная новизна проявляется, в том числе, в выработке принципов этих коэффициентов.

Для расчета экономического эффекта добровольческой студенческой активности в университете используется следующий алгоритм.

1. Определяется число добровольцев и количество часов, которое каждый из них затратил в указанный период времени по каждой из пяти категорий работ.

2. Вычисляется суммарное количество часов, посвященных выполнению задачи в определенный период времени.

3. Общее количество затраченных добровольцами часов по каждой из пяти категорий умножается на эквивалентную заработную плату, в результате чего получается условно исчисленная «стоимость времени», затраченного на добровольческую деятельность, то есть ее экономический эффект (условно-экономленные средства).

Таким образом, методика учета и оценки социальной активности студентов университетов, использованная при создании автоматизированной системы, включает как количественную оценку труда добровольцев (фактически отработанное время, условно-экономленные средства), так и качественную (отзыв организатора мероприятия, разделение работ в зависимости от трудоемкости). Для ведения аналитики по данному виду деятельности предусмотрена отчетность университета, состоящая из количественных и качественных показателей и критериев добровольческой активности.

Реализация разработанных методик через создание модели (сайта) позволила сформировать организационную модель функционирования инновационного механизма, который будет способствовать созданию условий для формирования в университете благоприятной среды через получение студентами возможности выбирать области приложения усилий и оценку их социальной активности (и всего академического сообщества). Следовательно, разработанная система способна стать инструментом, принимаемым в университетах для оценки социальной активности академического сообщества в процессе формирования рейтинга обучающихся, с одной стороны, а с другой – в процессе определения поощрений для сотрудников. Кроме того, данный механизм может служить источником статистических данных для аналитических исследований феномена добровольчества в России.

Заключение

Проект посвящен решению проблем оценки социальной активности студентов вузов, а также необходимости сертификации выпускников о полученных компетенциях в процессе обучения.

По результатам исследования выработана авторская методика оценки социальной активности академического сообщества. Она заключается в возможности организации добровольческой деятельности в университете, результаты которой сохраняются в базе

данных программного модуля и выражаются в форме рейтинга добровольца, который рассчитывается исходя из трудоемкости работ и фактически затраченного времени.

На основе данной методики разработан механизм, представляющий собой автоматизированную систему с программным модулем, встроенную в Интранет информационной системы Университета ИТМО, получивший название «СОДа-Да!» и расположенный по адресу: <http://sodada.ifmo.ru/>. Модель прошла апробацию в процессе организации, проведения и оценки результатов научных и общественных мероприятий, в том числе международного уровня. Было проведено 10 мероприятий, в которых приняли участие более 30 добровольцев.

Описываемая модель (как социальная инновация) может быть использована в университетах и некоммерческих организациях Санкт-Петербурга и России.

Развитие добровольческого движения на всех направлениях жизнедеятельности общества требует осмысления этих процессов, как со стороны координаторов, так и со стороны органов власти на местах. Динамика формируемой статистики позволит полнее представлять состав социальных потребностей общества, их распределение по местам формирования, возрасту и другим параметрам. Формирование информационного пространства о добровольческой деятельности и ее приоритетных направлениях позволит со временем формировать модель социального поведения общества.

Публикации

1. Г.П. Петропавлова, Л.В. Силакова. МИП в бюджетных учебных организациях: состояние и перспективы в НИС России // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – СПб., 2013. – Вып. 1. [Электронный ресурс] – URL: <http://economics.ihbt.ifmo.ru/file/article/42.pdf> (дата обращения: 05.12.2014).
2. Д.Ю. Будылин, С.В. Полатайко, Л.В. Силакова. Социальные инновации как фактор развития университета // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – СПб., 2013. – Вып. 2. [Электронный ресурс] – URL: <http://economics.ihbt.ifmo.ru/file/article/649.pdf> (дата обращения: 05.12.2014).
3. Л.В. Силакова. Профессиональные компетенции и способы их формирования в ВУЗе // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – СПб., 2014. – Вып. 1. [Электронный ресурс] – URL: <http://economics.ihbt.ifmo.ru/file/article/8963.pdf> (дата обращения: 05.12.2014).
4. Л.В. Силакова. Формирование инновационной среды вуза: обзор существующей практики // Материалы III Научно-практической интернет-конференции «Актуальные теоретические и практические аспекты развития предприятий различных форм собственности в контексте модернизации экономики». – СПб., 2013. [Электронный ресурс] – URL: http://eco-conf.ru/files/EiEM/konf3/2/2_silakova_lyubov_vladimirovna.pdf
5. Л.В. Силакова. Активизация научно-исследовательской и инновационной деятельности в ВУЗе как фактор развития экономики знаний // Труды VI Всероссийской Зимней школы по институциональной экономике. – Екатеринбург, 2013. – С. 202-206.
6. Г.П. Петропавлова, Л.В. Силакова. Волонтерство как социальный ресурс роста конкурентоспособности ВУЗа // Сборник трудов VII Санкт-Петербургского Конгресса «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке». – СПб.: РИЦ Минерально-сырьевого университета «Горный», 2013. – Круглый стол 5. – С. 195–199. – 365 с. [Электронный ресурс] – URL: http://www.spmi.ru/system/files/lib/univer/document/sbornik_trudov_vii_kongress_1.pdf
7. Г.П. Петропавлова, Л.В. Силакова. Социальные инновации в развитии высшей школы // Сборник VII Международного Форума От науки к бизнесу. – СПб.: «Соло», 2013. – С. 201-203. – 278 с.
8. Л.В. Силакова. Развитие волонтерской деятельности в университете как инструмент накопления социального капитала университетского сообщества // Инновационное развитие и кадровый потенциал молодежной и социальной сферы: материалы Международной Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

научно-практической конференции в г. Санкт-Петербурге 21–23 ноября 2013 г. – СПб., 2013. – С. 341–343. – 459 с.

9. Г.П. Петропавлова, Л.В. Силакова. Развитие социальных механизмов роста инновационной активности учёных и студентов вузов // Материалы VIII Международного Форума «От науки к бизнесу» «Глобализация университетов: новые возможности для науки и бизнеса». - Санкт-Петербург: «СОЛО», 2014. С. 128–130.

10. Л.В. Силакова Разработка системы учета и оценки волонтерской деятельности студентов вуза // Научные работы участников конкурса "Молодые ученые НИУ ИТМО" 2013 г. – Санкт-Петербург: Конкурс Молодых учёных НИУ ИТМО, 2014. – С. 180-185. [Электронный ресурс] – URL: <http://science.ifmo.ru/file/stat/242/my2014.pdf> (дата обращения: 05.12.2014).

Литература

1. Е.В. Крутицкая Компетентностный подход к организации волонтерской деятельности молодежи в высшей школе // [Электронный ресурс] Всероссийский научно-практический журнал «Волонтер» 2013. – № 1-2. – С. 11-21. – Режим доступа: <http://spbsseu.ru/sites/default/files/volonter1-2newred.pdf> (дата обращения: 17.10.2014).

2. А.В.Трохина Оценка трудового потенциала и экономических эффектов волонтерства // [Электронный ресурс] Теория и практика общественного развития. 2012. – № 12. – Режим доступа: <http://www.teoria-practica.ru/-12-2012/economics/trokhina.pdf> (дата обращения: 17.10.2014).

3. Е.М. Харланова Исследование социальной активности студентов // Историческая и социально-образовательная мысль. 2011. – № 5 (10). – С. 173.

4. Manual on the measurement of volunteer work / [Электронный ресурс] International Labour Office. Department of statistics. – Geneva: ILO, 2011. – Режим доступа: http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/@dgreports/@stat/documents/publication/wcms_162119.pdf (дата обращения: 17.10.2014).



Смирнов Николай Викторович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра компьютерной фотоники и видеoinформатики
E-mail: pirate_korsar@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Н.В. Смирнов

Научный руководитель – профессор С.М. Латыев

Цели работы – создание экспериментальной установки для юстировки растров (шкал) угловых преобразователей, а также стенда для контроля их точностных характеристик, снабженного разрабатываемым специальным соединительным устройством.

Основными погрешностями оптико-электронных преобразователей угловых перемещений, основанных на круговых растрах как мерах угла, являются их эксцентриситеты и погрешности деления периода штрихов рабочих дорожек [1]. Наибольший интерес представляет эксцентриситет растра (несовпадение центра деления штрихов с осью вращения диска). Для уменьшения значения эксцентриситета при сборке

растра производят его центровку различными способами относительно оси вращения. В практике современного приборостроения наиболее часто применяемой является центровка по юстировочной окружности, изготовленной за одну операцию с делением штрихов.

Операция центровки обычно осуществляется с помощью измерительного микроскопа [1] или юстировочного автомата высокой производительности [2]. Но все используемые схемы имеют ряд существенных недостатков. Остаточная величина децентрировки растров при центрировании по юстировочной риске обусловлена не только чувствительностью микроскопов и биениями подшипников вращения, но также некруглостью юстировочной марки и неточностью ее расположения относительно рабочих штрихов. Кроме этого, центровка растра по юстировочной окружности не позволяет компенсировать влияние первой гармоники периодической погрешности деления штрихов растра.

На основании этого был разработан стенд (рис. 1) для центровки растра по электрическим сигналам, поступающим на вход компьютера (цифрового осциллографа) с двух считывающих систем, установленных диаметрально противоположно на рабочей дорожке штрихов растра.

Центрируемый растр устанавливают на оправу осевой системы преобразователя и приводят в равномерное вращение. Электрический сигнал квазисинусоидальной формы (рис. 2), вырабатываемый одной системой, преобразуется формирователем в строб в виде узкого прямоугольного электрического импульса и подается на вход осциллографа. На тот же вход подается квазисинусоидальный сигнал, вырабатываемый противоположной считывающей системой. Для устранения суммарного эксцентриситета растра прямоугольный импульс, играющий роль индекса, необходимо перемещать относительно квазисинусоиды (по которой синхронизирована развертка осциллографа) из положения I в положение II.

Чувствительность этого способа выявления децентрировки растра оказалась весьма высока благодаря масштабному усилению электрических сигналов на осциллографе и высокой чувствительности зрения оператора. Так, значение остаточной децентрировки растра составило всего 0,05 мкм.

Центровка растра осуществляется пьезодвижителем по сигналу компьютера. Отъюстированное положение растра фиксируется ультрафиолетовым клеем. На данном этапе окончательная фиксация проходит в ручном режиме. В будущем предполагается доработать конструкцию и программное обеспечение стенда для наиболее полной автоматизации процесса центровки растров.

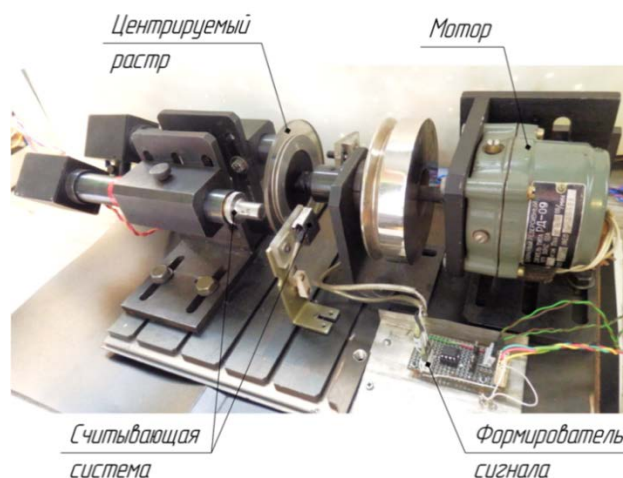


Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда для центровки растров

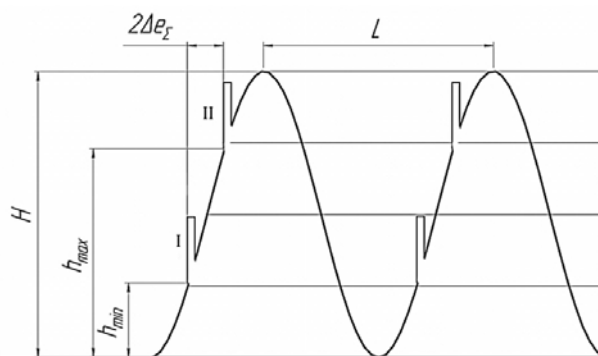


Рис. 2. Вид сигнала на экране осциллографа

После операции центрировки возникает необходимость проконтролировать точностные характеристики собранного устройства. Измерение точности контролируемых преобразователей обычно осуществляется путем сравнения их работы с эталонными угловыми датчиками [3, 4]. В большинстве случаев, для этого соединяют валы поверяемого и эталонного преобразователей муфтой, приводят валы в синхронное вращение и сравнивают значения преобразования кругового движения валов обоих датчиков. Эталонный преобразователь при этом должен иметь не менее чем трехкратный метрологический запас по точности по сравнению с контролируемым устройством.

Основная проблема заключается в том, что для соединения валов контролируемого и эталонного преобразователей необходимо использовать компенсационную либо глухую муфту. Недостатком такого способа контроля является то, что компенсационные муфты передают движение с одного вала на другой с погрешностями, значение которых зависит от точности взаимного расположения соединяемых валов (таких как их несоосность, перекосы, осевые и радиальные биения [1]). Довольно часто погрешности передачи вращения компенсационными муфтами превосходят погрешности самих контролируемых датчиков, причем учесть их влияние на точность контроля достаточно проблематично. Кроме того, перед контролем валы эталонного и поверяемого преобразователей необходимо тщательно выставлять друг относительно друга (то есть осуществлять контроль радиального и торцевого биения). Все это затрудняет процесс контроля, увеличивая трудоемкость процесса и уменьшая достоверность получаемых результатов.

Для решения этой задачи в рамках проекта было спроектировано и собрано специальное устройство сопряжения, обеспечивающее принцип отсутствия избыточных связей при соединении преобразователей и позволяющее учесть погрешность его работы. Оно представляет собой (рис. 3) параллелограммный механизм со сферическими шарнирами, связывающими его с корпусом контролируемого преобразователя и рычажной планкой, ось поворота которой перпендикулярна плоскости параллелограммного механизма. Механизм позволяет устранить влияние радиального биения и осуществляет передачу угла поворота контролируемого и эталонного преобразователей без искажений. Он компенсирует все пять необходимых нам подвижек контролируемого преобразователя относительно эталонного.

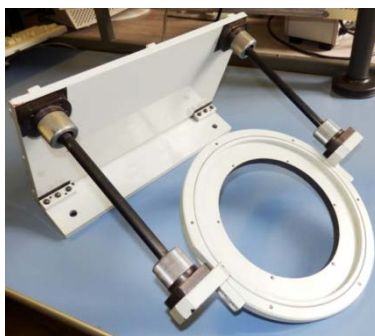


Рис. 3. Внешний вид разработанного устройства сопряжения

На рис. 4 представлена общая функциональная схема разработанного стенда для контроля точности угловых преобразователей, снабженного созданным специальным устройством сопряжения. Стенд содержит прецизионный эталонный датчик 1. Вал образцового преобразователя соединен глухой муфтой 2 с валом контролируемого преобразователя 3, корпус которого ограничен от поворота вокруг собственного вала (оси Z) разработанным узлом 4. Так как валы образцового и контролируемого преобразователей имеют осевое, а также линейное и угловое радиальные биения, то узел ограничения поворота корпуса преобразователя должен обеспечивать все степени подвижности относительно неподвижной пространственной системы координат XYZ (за исключением искомого разворота вокруг оси Z). Созданный экспериментальный измерительный стенд, помимо специального соединительного устройства, снабжен также цифровым автоколлиматором. Он необходим для контроля возможных отклонений положения соединительного устройства в текущий момент времени и устройства программного управления для алгоритмической (цифровой) коррекции результатов контроля преобразователя. Для защиты стенда от вибраций эталонный преобразователь установлен на амортизаторы.

Стенд позволяет контролировать преобразователи угловых перемещений фактически в неограниченном числе точек контроля, компенсировать погрешность устройства сопряжения контролируемого и образцового преобразователей, что существенно повышает точность и производительность осуществляемого контроля.

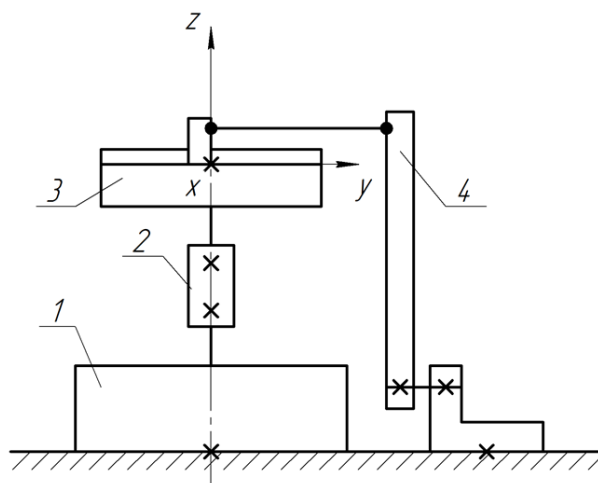


Рис. 4. Функциональная схема подключения стенда

В будущем планируется провести дополнительные сравнительные экспериментальные исследования воспроизводимости точностных характеристик угловых преобразователей при использовании различных средств соединения валов.

Заключение

В ходе выполнения проекта были достигнуты следующие результаты:

- проведен анализ ошибок угловых преобразователей и устройств для их контроля;
- предложены новые схемы и составлено описание устройств для контроля преобразователей угловых перемещений;
- создан высокоточный автоматизированный стенд для центрировки растров преобразователей угловых перемещений;
- реализован стенд для контроля точностных характеристик угловых преобразователей перемещений, снабженный устройством сопряжения, позволяющим учесть погрешность его работы;
- реализованы устройства для фиксации (соединения) валов преобразователей при контроле;
- проведен анализ устройств, показавший правильность функционирования предложенных установок для контроля.

Публикации

1. Смирнов Н.В. Юстировка и метрологический контроль оптико-электронных преобразователей угловых перемещений // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 41–42.
2. Smirnov N., Latyev S.M., Theska R. Adjustment and evaluation of incremental optical rotary encoders // Shaping the Future by Engineering: 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium. Programme. 2014. P. 48.

Литература

1. Латыев С.М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. – Л., 1985. – 248 с.
2. Weber G. Justageautomat für Drehgeber-Impulsscheiben // Maschinenbau von Makro bis Nano: 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Proceedings. 2005. P. 59–60.
3. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла. Принципы построения, теория точности, методы контроля. – М., 1984. – 328 с.
4. Патент на изобретение СССР 824265 «Способ поверки преобразователей угла поворота вала в код и устройство для его осуществления», опубл. 23.04.1981.



Смирнов Роман Игоревич
Факультет точной механики и технологий
Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии
E-mail: sri7@mail.ru

МЕТОД РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПО ГЛУБИНЕ ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ ДЛЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ПО ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ОСВОЕНИЮ РОССИЙСКОГО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА

Р.И. Смирнов

Научный руководитель – доцент Д.В. Казунин

Для эффективного обучения и переподготовки кадров необходимы полномасштабные тренажеры с физическими устройствами управления, максимально приближенными к реальным системам управления. Одним из таких тренажеров является продукт ЗАО «Транзас Морские Технологии» – тренажер морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) «Приразломная» (рис. 1), моделирующий работу всего технологического оборудования на борту.

Основную роль в любом тренажерном комплексе играет математическая модель, которая выполняет вычисления и обменивается данными с интерфейсом. В работе описан метод расчета распределения давления, плотности, вязкости и температуры, реализованный в математической модели тренажера. Решение большинства задач при добыче нефти из скважин связано со знанием характера распределения давления по длине подъемных труб, что позволяет определить и установить наиболее рациональный способ извлечения продукции на поверхность, определить оптимальный режим работы скважины [1].



Рис. 1. МЛСП «Приразломная»

При теоретическом представлении газожидкостного потока используют две основные модели течения: гомогенную и со скольжением (относительной скоростью) фаз. Все существующие на сегодняшний день как отечественные, так и зарубежные практические методы расчета газожидкостного потока можно классифицировать по особенностям модели, положенным в их основу. Для тренажерного комплекса важным критерием является высокая скорость вычисления каждого шага. Анализ различных методов расчета показал (см. Таблицу), что метод Сахарова обладает наибольшим быстродействием [2]. Его погрешность является допустимой, поскольку не выходит за пределы допустимой погрешности тренажерного комплекса в целом (для имитационного моделирования это 10 %).

Таблица

Существующие методики расчета распределения давления в скважине

Метод расчета	$Q_{ж}$, м ³ /сут	R_z , м ³ /м ³	D_m , м	$\mu_{ж}$, мПа·с	СКО, %
Ф. Поэтмана- П. Карпентера (В.А. Сахаров)	9,5 – 238,5	5,6–910	0,0507– 0,0762	1–12	±8,39
П. Баксендела	230–2240	50–230	0,0380– 0,0782	–	±6,73
А.П. Крылова- Г.С. Лутошкина	8–540	0–400	0,0381– 0,0762	1–15,2	±6,61
ВНИИгаза	–	–	0,015– 0,106	1–250	±6,55

где $Q_{ж}$ – расход флюида м³ в сутки, R_z – газовый фактор, D_m – диаметр подъемника, $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость, СКО – среднеквадратическое отклонение.

Таким образом, было принято решение взять метод Сахарова (Поэтмана-Карпентера) за основу, дополнив его вычислениями температуры, используя критерий Стантона, динамической вязкости по зависимости, предложенной И.И. Дунюшкиным, и расчетом физических свойств нефти в процессе ее однократного разгазирования [3]. В конечном итоге гидравлический расчет сводится к построению профиля давления в работающей скважине $p = f(H)$, который позволяет определить давление как в любой точке подъемных труб, так и на забое [4]. Результаты вычислений для различных методов, но для одной и той же скважины представлены на рис. 2 и 3.

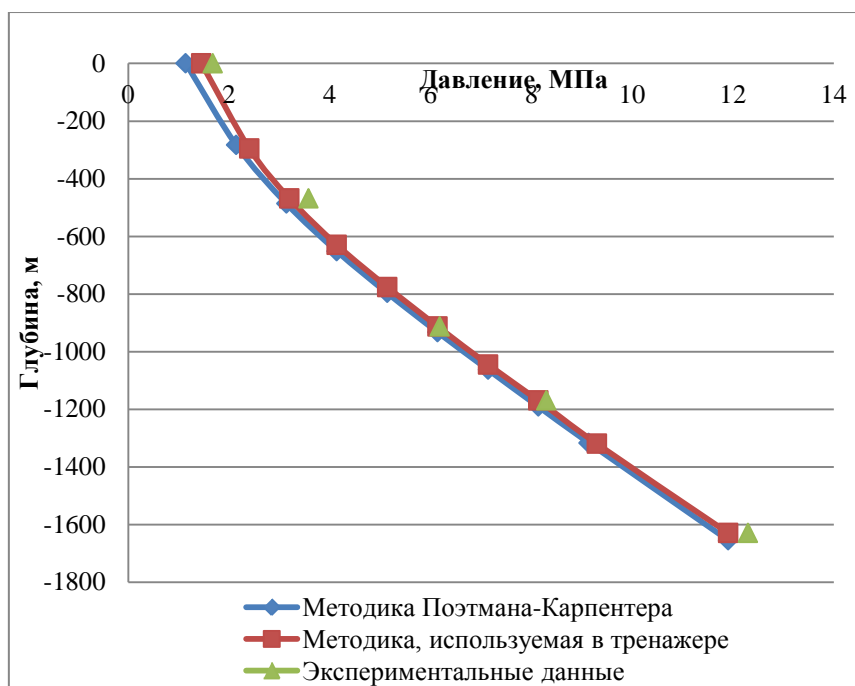


Рис. 2. Расчет распределения давления различными методами

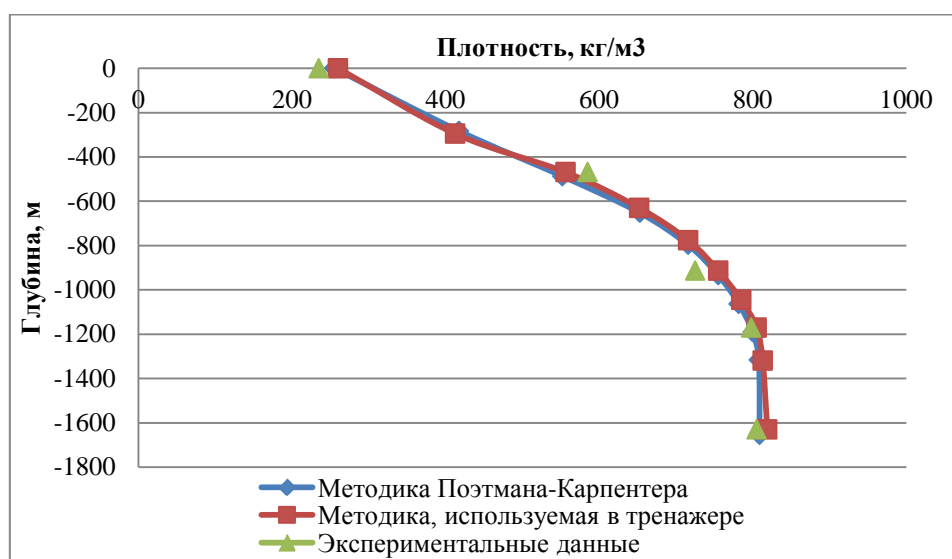


Рис. 3. Расчет распределения плотности различными методами

Заключение

Предложенный метод расчета параметров был внедрен в разработанную термодинамическую модель тренажерного комплекса. Пересчет распределения давления, плотности, вязкости и температуры осуществляется на каждом шаге работы модели, примерно раз в секунду при обычном режиме работы и 25 раз в секунду – при ускоренном. Форма кривой распределения давления зависит как от параметров самого флюида, так и от состояния задвижек арматуры на устье, притока в скважину, диаметров эксплуатационной колонны и подъемника. Информация о распределении параметров по глубине является исходными данными для решения большинства задач при добыче нефти, позволяет вывести скважину на необходимый режим ее извлечения, более точно контролировать как стационарный, так и динамический уровень нефти в скважине. Данные о распределении параметров являются необходимыми для подбора оборудования как добывающих, так и скважин, предназначенных для поддержания пластового давления. Это не только толщина

и диаметры обсадных труб, задвижек и арматуры, это и подбор электроцентробежного насоса, количества ступеней, электродвигателя к нему. Данные о распределении параметров необходимы также для запуска насоса и вывода его на рабочий режим с целью поддержания заданного дебита скважины.

В заключении выделим наиболее значимые результаты работы:

1. Проанализированы существующие методики расчета давления, плотности, температуры и вязкости газожидкостной смеси по высоте подъемных труб в добывающей скважине.

2. Предложен новый метод расчета параметров газожидкостной смеси по высоте подъемных труб в добывающей скважине, в основу которого положен метод В.А. Сахарова, дополненный вычислениями температуры по критерию Стантона, динамической вязкости по зависимости, предложенной И.И. Дунюшкиным, и расчетом физических свойств нефти в процессе ее однократного разгазирования.

3. Погрешность метода не превышает погрешность, допускаемую в рамках имитационного моделирования тренажерного комплекса – 10 %.

4. Разработанный метод внедрен в термодинамическую модель тренажера МЛСП «Приразломная».

Публикации

1. Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А. Технологическая платформа // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ 2011616397, опубл. 17.02.2011.

2. Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А. Тренажер газового терминала LCHS Gas (ТГТ) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ 2011610224, опубл. 05.09.2011.

3. Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А. Тренажер грузобалластных операций на сухогрузных судах LCHS 6000 Cargo (ТГОСС) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ 2011610225, опубл. 05.09.2011.

4. Белентьев А.В., Поселеннов А.А., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А. Тренажер морской нефтедобывающей платформы (Добыча 2011) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ 2011610227, опубл. 05.09.2011.

5. Белентьев А.В., Смирнов Р.И., Поселеннов А.А., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Малюгин А.А. Тренажер полупогружной буровой установки FOS 6000 (ТПБУ) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2011610228, опубл. 08.10.2013.

6. Казунин Д.В., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Ганс Е.С., Смирнов Р.И., Маценко С.В., Хвастунов А.П. Создание динамических средств обучения для подготовки специалистов, связанных с добычей углеводородного сырья на арктическом шельфе // Морской вестник. 2010. № 4 (36). С. 95–98.

7. Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Смирнов Р.И. Тренажер грузобалластных операций сухогрузного судна // Мат-лы международной научно-практической конференции «Водный транспорт России: Инновационный путь развития». Т. 2. СПб., 2011. С. 290–296.

8. Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Хвастунов А.П., Смирнов Р.И., Казунин Д.В. Тренажер плавучей полупогружной буровой установки // Мат-лы международной научно-практической конференции «Водный транспорт России: Инновационный путь развития». Т. 2. СПб., 2011. С. 273–277.

9. Смирнов Р.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В. Автоматизированная система управления технологическими процессами // Патент на изобретение РФ 116253, опублик. 20.12.2011.
10. Смирнов Р.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В. Тренажер морских нефтедобывающих платформ // Патент на полезную модель РФ 104359, опублик. 10.05.2011.
11. Смирнов Р.И., Бутурлимов О.В., Казунин Д.В. Метод расчета распределения параметров по глубине добывающей скважины // Известия вузов. Приборостроение. (в печати).

Литература

1. Мищенко И.Т., Сахаров В.А. Сборник задач по технологии и технике нефтедобычи: Учеб. пособие для вузов. – М., 1995. – 272 с.
2. Бойко В.С. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений. М., 1996. – 426 с.
3. Дунюшкин И.И., Елисеева Е.И. Расчеты физико-химических свойств пластовой и промысловой нефти и воды. – М., 2004. – 447 с.
4. Мищенко И.Т. Расчеты в добыче нефти. – М., 1993. – 244 с.



Соколов Юрий Александрович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики
E-mail: sokolov-juri@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МАЛЫХ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ДИФРАКЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Ю.А. Соколов

Научный руководитель – доцент В.Н. Назаров

В работе исследуется схема измерения малых угловых и линейных перемещений, основанная на анализе интерференционной картины, образованной дифракционным интерферометром. В отличие от схем интерферометров с делением пучка излучения в данном интерферометре волновые фронты формируются дифракционными элементами – щелевыми апертурами. Такой подход упрощает конструкцию интерферометра и его юстировку, а также уменьшает габариты и цену.

Исследуемые в работе схемы представлены на рис. 1. Здесь перед линзами 8 и 9 установлена плоскопараллельная стеклянная пластина 3 с одинаковыми прямоугольными отверстиями (на рисунках они обозначены черными кружками), на которые падает коллимированный пучок излучения от лазерного источника 5, коллиматора 6 и зеркала 2. В плоскости приемника 1 наблюдается суперпозиция интерференционных картин от каждой из пар щелевых апертур и дифракционной картины от одной апертуры.

В случае дифракционного автоколлиматора (рис. 1а) чувствительность к углу поворота автоколлимационного зеркала во всех точках одной интерференционной картины постоянна. При этом чувствительность интерференционной картины, образованной осевой парой апертур (имеющих нулевые поперечные смещения от горизонтальной штрихпунктирной линии $v_1=v_2=0$ мм), минимальна и определяется продольным расстоянием между апертурами

и начальным углом падения излучения. Чувствительность внеосевой интерференционной картины (от пары апертур, расположенной на наклонной штрихпунктирной линии и имеющих $v_1=0$; $v_3 \neq 0$) растет с увеличением величины поперечного смещения апертуры от оси системы v_3 (рис. 1а) и не зависит от угла падения излучения и расстояния от пластины до призмы. Такая компоновка схемы помимо большей компактности позволяет одновременно получить высокую чувствительность и большой диапазон абсолютных измерений по сравнению с более простой схемой (без призмы и с двумя апертурами), исследованной в [1].

В случае индикатора линейных перемещений (рис. 1б) пластина с апертурами крепится к подвижному измерительному штоку 7. При перемещении штока на величину Δv происходит одновременное смещение обеих апертур, и, как показано на рис. 1б пунктиром, проекции апертур расходятся на удвоенную величину $2\Delta v$, что означает двукратное увеличение чувствительности по сравнению со случаем смещения одной из апертур в [1]. Для схемы с одной парой апертур в плоскости приемника наблюдается одна интерференционная картина, центр которой смещается на приемнике при движении штока. Чувствительность к смещению штока в различных точках на приемнике не одинакова и определяется их удаленностью от точки минимума чувствительности – точки, где линза 8 фокусирует наклонный коллимированный пучок излучения, сформированный лазерным модулем 5 и коллимирующей линзой 6. При удалении от данной точки частота колебаний интенсивности, приходящаяся на некоторую величину смещения штока, резко возрастает. При изменении угла падения излучения происходит смещение всей картины распределения чувствительностей по приемнику. Описанные явления дают возможность одновременного получения нескольких измерительных сигналов с заданной чувствительностью и позволяют расширить диапазон абсолютных измерений за пределы одного колебания интенсивности.

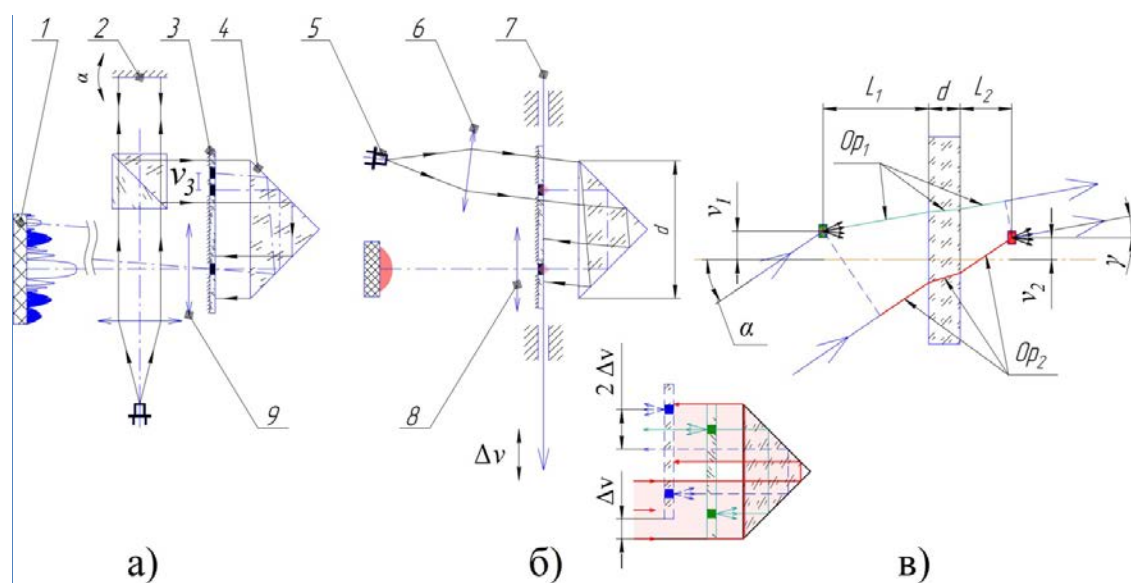


Рис. 1. Оптические схемы: а – дифракционный автоколлиматор; б – дифракционный индикатор линейных перемещений; в – влияние призмы 4 на оптическую разность хода между дифрагированными волновыми фронтами

В ходе оценки чувствительностей данных схем была получена предварительная модель интерференции двух точечных источников, расположенных с двух сторон от стеклянной плоскопараллельной пластинки, толщина d которой равна геометрической длине хода осевого луча в призме (рис. 1в). С помощью математических методов теории систем и интегральных преобразований в оптике была получена математическая модель, описывающая двумерное распределение излучения в фокальной плоскости тонкой линзы для схем дифракционного автоколлиматора и индикатора линейных перемещений.

Для оценки диапазона измерений дифракционного автоколлиматора и его габаритов графо-аналитическим путем была получена инженерная методика расчета основных

конструктивных параметров схемы (рис. 2.). Так, при диаметре пучка излучения $D_{св} = 27,5$ мм; длине волны $\lambda = 0.65$ мкм; дистанции до контролируемого зеркала $L_{изм} = 200$ мм; ширине кубика $D_k \approx 44$ мм; вертикальном размере призмы $Dn_{верт} \approx 65$ мм; размерах апертур $a = 17$ мкм и фокусе объектива $f \approx 106$ мм максимальный диапазон измерений составляет от $-2000''$ до $+3000''$, при этом габаритные размеры схемы – 200×135 мм.

Для проверки полученных теоретических положений и математической модели были разработаны две стеклянные маски (с различными размерами и взаимным расположением апертур), впоследствии изготовленные на фирме Compugraphics Jena GmbH (рис. 3).

Также были собраны две экспериментальные установки: полуавтоматическая (для проверки влияния угла падения излучения на интерференционную картину, рис. 4а) и автоматическая (для проверки влияния линейного перемещения пластины с апертурами, рис. 4б).

В ходе экспериментов использовалась цветная камера EVS VEI-535 с размером пикселя $2,775 \times 2,775$ мкм, работающая в монохроматическом режиме. Получение фотографий интерференционных картин с камеры и настройка ее параметров производились автоматически в среде MatLAB. Чтобы нейтрализовать засветку одной из интерференционных картин (из-за перепада интенсивности между главным и побочными максимумами дифракционной картины), для каждого значения углового или линейного смещения проводилась последовательная съемка двух кадров с различными уровнями максимальной экспозиции. Также для увеличения соотношения сигнал / шум при регистрации интерференционных картин в области дальних порядков дифракции число фотографий увеличивалось до 20. Величина угла поворота зеркала контролировалась с помощью автоколлиматора Elcomat 3000 с разрешающей способностью $0,1''$. Поперечное смещение пластины с апертурами задавалось с помощью каретки, управляемой шаговым двигателем. Минимальный шаг смещения столика составлял приблизительно $0,7$ мкм. Точная величина его смещения контролировалась интерферометром SIOS SP-120 с разрешающей способностью 20 нм.

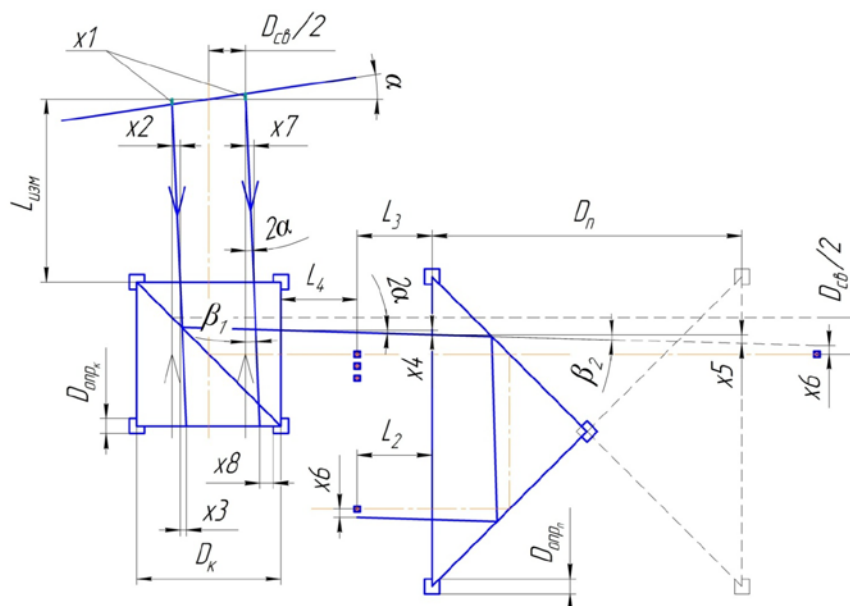


Рис. 2. Трассировка лучей через схему дифракционного автоколлиматора при развороте автоколлимационного зеркала на максимальный угол против часовой стрелки

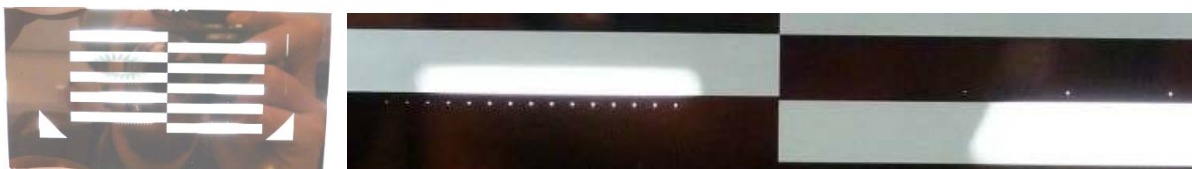


Рис. 3. Стеклопластина с различными размерами апертур

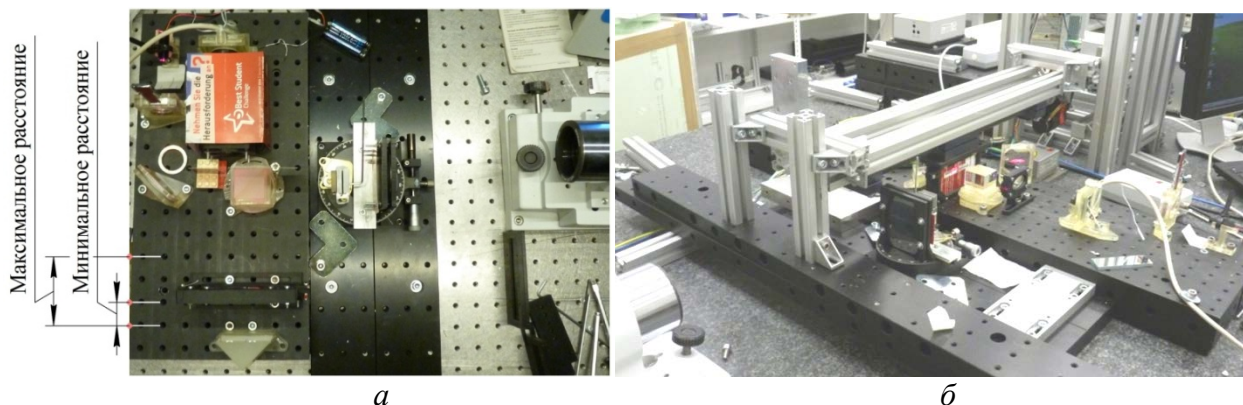


Рис. 4. Экспериментальные установки для контроля: а – угловых и б – линейных перемещений

Исследование влияния угла падения излучения на интерференционную картину проводилось для трех различных расстояний между пластиной и призмой (рис. 4а) и различных поперечных расстояний между апертурами v_3 (рис. 1а). На рис. 5 представлен пример фотографии, совмещенной из двух других (с различными уровнями экспозиции), полученных при среднем положении пластины для трех пар апертур ($v_1 = v_2 = 0$ мм; $v_1 = 0$ мм и $v_3 = 4$ мм; $v_1 = 0$ мм и $v_4 = 8$ мм; ширине апертуры, равной 50 мкм в плоскости рис. 1 и равной 100 мкм в плоскости, перпендикулярной ему).

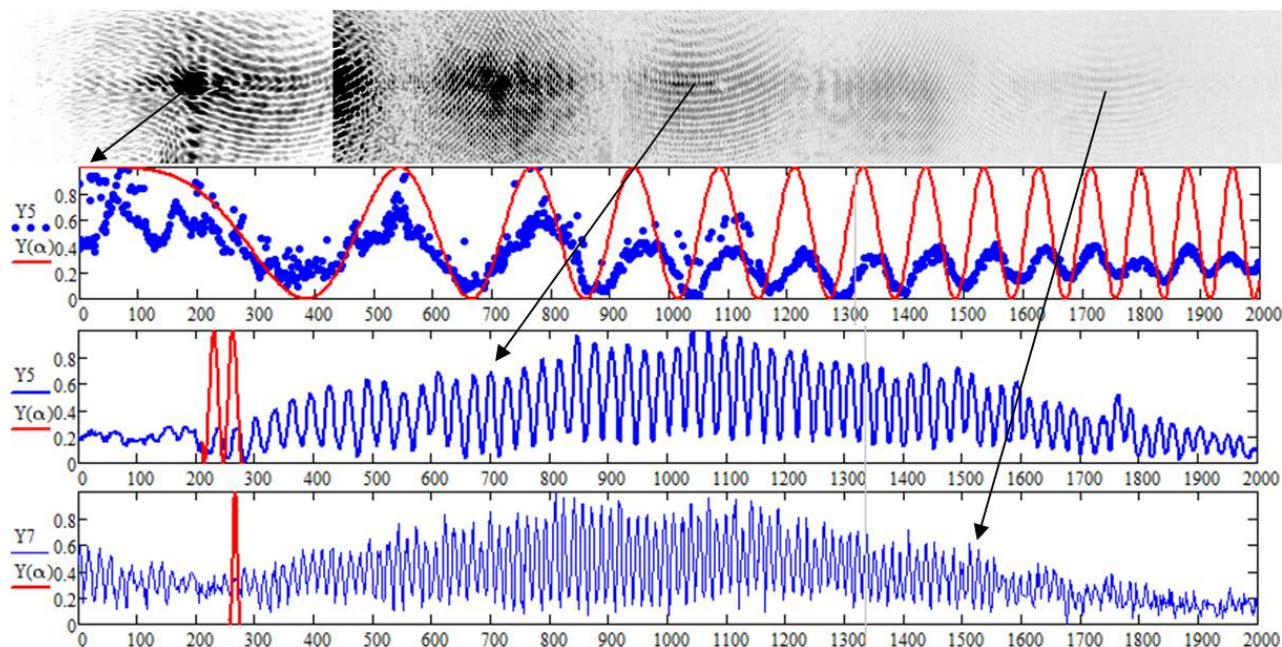


Рис. 5. Пример результата эксперимента, полученного на установке (рис. 4а)

На том же рис. 5. под фотографией представлены графики колебаний интенсивности в точках центров трех интерференционных картин при изменении угла поворота зеркала α от 0 до 2000". Гладкая кривая, достигающая нулевого и единичного значений интенсивности при каждом колебании, – результат, полученный с помощью интерференционной модели. На

рис. 5. видно, что модель адекватно отражает чувствительности интерференционных картин от различных пар апертур. Для определения величины поворота контролируемого зеркала по полученным фотографиям в среде MatLAB написана программа и проведена ее калибровка. С помощью специального алгоритма, основанного на сравнении распределений интенсивности в линиях экспериментальной и расчетных интерференционных картин, для каждой из экспериментальных картин была определена величина угла поворота зеркала. Затем была определена погрешность макета, как разность между результатами, полученными с помощью автоколлиматора и составленной программы. Максимальная погрешность измерений в ходе экспериментов составила около 2,5".

Дальнейшее уменьшение погрешности возможно путем совершенствования алгоритма обработки экспериментальных данных или за счет повышения максимальной чувствительности схемы (уменьшением длины волны излучения, габаритных размеров призмы и/или показателя преломления стекла призмы, увеличением поперечного смещения v крайней внеосевой целевой апертуры).

Максимальный диапазон абсолютных измерений в ходе экспериментов ограничивался величиной близкой к 1800" из-за медленного изменения интенсивности в осевой интерференционной картине в области, близкой к нулю, а также большого размера апертур по горизонтали (50 мкм).

Дальнейшее расширение диапазона измерений в два раза за счет перехода через нулевую величину угла возможно при модификации осевой пары апертур. Это связано с заменой одной из двух осевых апертур двумя, расположенными с двух сторон от оси системы на равных расстояниях от нее. В этом случае вместо одной интерференционной картины будут наблюдаться две, при этом картина колебаний интенсивности в их центрах при нулевом значении измеряемого угла сместится по шкале угловых величин в область большей чувствительности (рис. 4). При изменении угла падения излучения от нулевого положения в положительном или отрицательном направлении чувствительность одной из картин будет снижаться, приближаясь к нулевой, в то время как чувствительность второй интерференционной картины – нарастать. Тогда, зная положение пятна засветки, можно производить «переключение» между данными картинками, выбирая наиболее чувствительную, что позволяет объединить диапазоны измерений слева и справа от нулевого значения измеряемого угла.

Исследование влияния поперечного смещения пластины проводилось при различных углах падения излучения (от 0 до 80' с шагом в 10') для одной пары апертур. Дополнительно был проведен один эксперимент с тремя парами апертур. Полученные результаты подтвердили теоретические положения работы и показали возможность использования интерференционной модели для оценки чувствительности схемы к поперечным смещениям маски с апертурами (пример экспериментального результата представлен на рис. 6.).

Достигнутая в экспериментах разрешающая способность схемы при регистрации смещения интерференционной полосы с дискретностью, равной $\frac{1}{4}$ ее ширины составила ≈ 2 мкм. Дальнейшее повышение ее разрешающей способности возможно за счет дополнительной обработки интерференционной картины; путем регистрации ее в дифракционных максимумах более высоких порядков (посредством сдвига приемника или объектива или благодаря увеличению угла падения излучения на схему), а также с помощью уменьшения длины волны источника излучения. Достигнутый диапазон измерений схемы при последовательном увеличении линейного перемещения и шаге его изменения не более чем на 8 мкм составил ≈ 5 мм. Его дальнейшее увеличение (до 15 мм) в установке на рис. 4б возможно путем использования большего числа пар апертур.

Заключение

Рассмотрены компактные дифракционные схемы контроля малых угловых и линейных перемещений. В ходе исследования для данных схем разработаны: математическая модель

интерференции лучей от двух точечных источников излучения, расположенных с двух сторон от плоскопараллельной стеклянной пластины и «дифракционная» модель, описывающая двумерное распределение излучения в фокальной плоскости линзы.

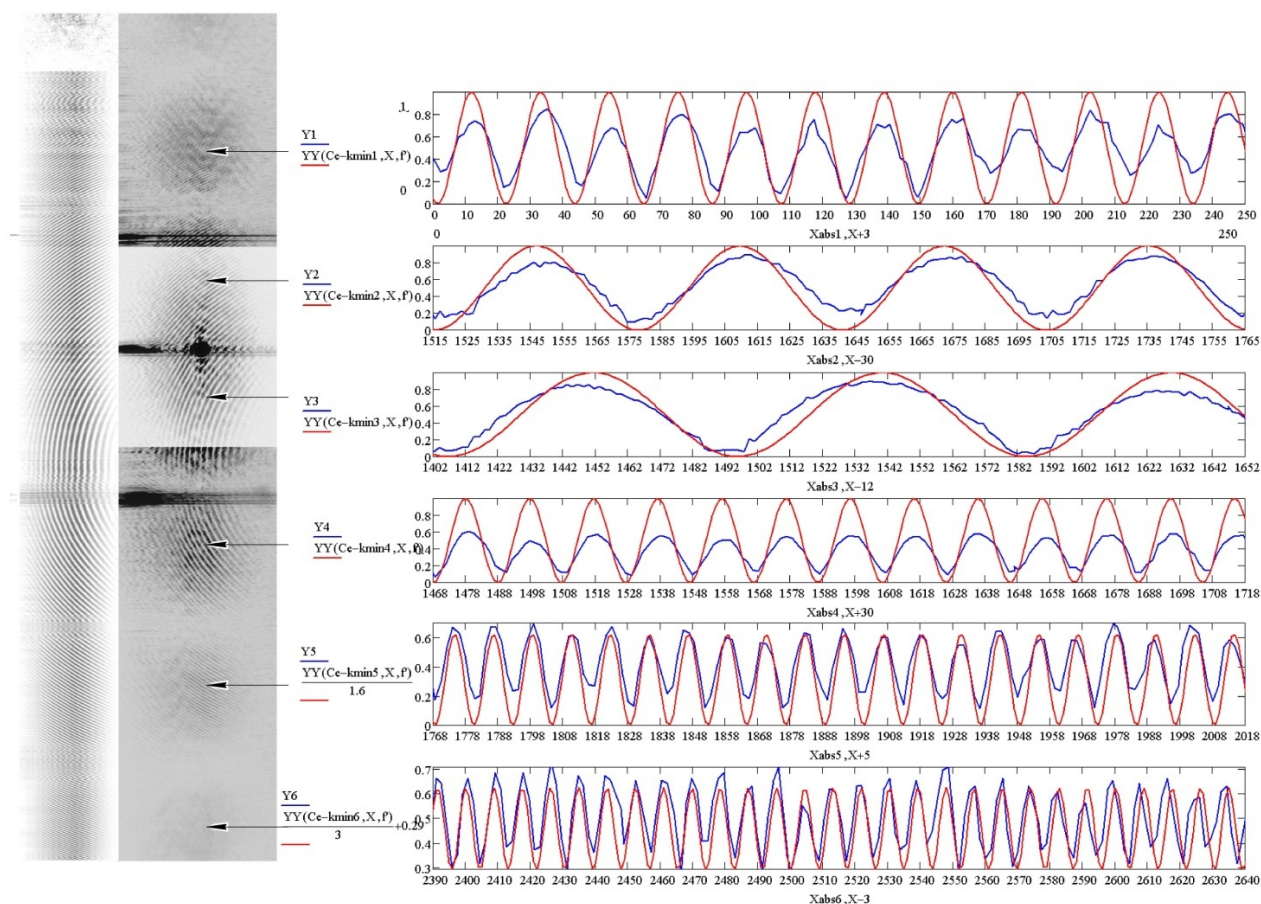


Рис. 6. Колебания интенсивности в различных точках приемника при смещении пластины с двумя апертурами и нулевом угле падения излучения на апертуры

Разработана методика расчета конструктивных параметров многоапертурного дифракционного автоколлиматора. Показано, что при вдвое большей компактности 200x135 мм схема может обладать большим диапазоном измерений -2000–3000" по сравнению с фотоэлектрическими автоколлиматорами.

Для проверки правильности моделей в лаборатории ТУ Ильменау собраны измерительные стенды и проведены экспериментальные исследования. Для макета дифракционного автоколлиматора в среде MatLAB разработана программа, основанная на сравнении распределений интенсивности в линиях экспериментальных и расчетных интерференционных картин. Полученные в ходе исследований погрешности макета дифракционного автоколлиматора с использованием измерительной программы составили около 2,5". Разрешающая способность макета индикатора линейных перемещений при регистрации смещения интерференционной полосы с дискретностью, равной $\frac{1}{4}$ ее ширины, оценивается в 2 мкм.

Полученные метрологические показатели экспериментальных макетов не являются предельными и могут быть улучшены посредством совершенствования способа обработки интерференционных полос или модификацией схемных параметров.

Публикации

1. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Исследование схемы дифракционного контроля положений объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 1 (71). С. 6–9.

2. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Дифракционный метод контроля пространственного положения объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 11. С. 53–56.
3. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Дифракционный метод контроля угловых и линейных перемещений // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 4. С. 78–82.
4. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Новый метод дифракционного контроля малых угловых и линейных перемещений // Труды X Международной конференции «Прикладная оптика – 2012». Т. 1. СПб., 2012. С. 152–156.
5. Соколов Ю.А. Новый метод дифракционного контроля малых угловых и линейных перемещений // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып.2. СПб., 2013. С. 54–56.
6. Соколов Ю.А. Новый метод дифракционного контроля малых угловых и линейных перемещений // Альманах научных работ молодых ученых. СПб., 2013. С. 289–292.
7. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Новый метод дифракционного контроля малых угловых и линейных перемещений // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 12. С. 53–59.
8. Nazarov V.N., Sokolov Yu. A. New method of diffraction monitoring of small angular and linear displacements // Journal of Optical Technology. 2013. Vol. 80. No. 12. P. 756–760.

Литература

1. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Новый метод дифракционного контроля малых угловых и линейных перемещений // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 12. С. 53–59.



Тушев Сергей Александрович
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем
E-mail: sergy5@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОРСКОЙ КАЧКИ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕСКОПА

С.А. Тушев

Научный руководитель – доцент В.С. Томасов

Реализация прецизионных электроприводов телескопа траекторных измерений, устанавливаемого непосредственно на палубе корабля без использования гиростабилизированной платформы, позволяет не только существенно снизить затраты на дополнительное оборудование, но и повысить быстродействие системы наведения, а также конечную точность сопровождения космического объекта. Поэтому задачи исследования и разработки систем управления такими электроприводами являются вполне актуальными. Целью проекта является разработка и исследование системы управления прецизионными электроприводами телескопа, установленного на палубе корабля, позволяющей компенсировать влияние морской качки без использования гироплатформы.

Задающее воздействие при морской качке

Для оценки влияния качки на задание угловых координат опорно-поворотного устройства (ОПУ) определяется закон, по которому меняются координаты в системе

координат (СК), связанной с кораблем. Для выполнения этой задачи совмещается начало отсчета СК с точкой пересечения осей ОПУ.

Схема килевой качки корабля представлена на рис. 1. Для каждого вида качки на основании геометрических построений получены формулы, связывающие координаты корабельной и инерциальной СК. ОПУ имеет две оси вращения и, соответственно, две угловые координаты – азимут и угол места.

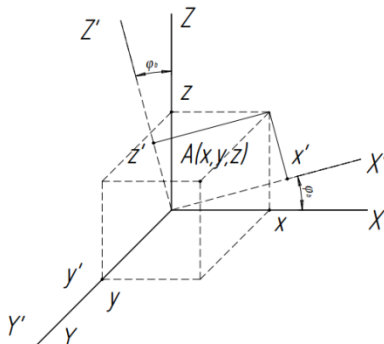


Рис. 1. Преобразование координат при килевой качке

Качка в общем случае представляет собой случайный процесс с известной спектральной плотностью. Однако в первом приближении ее можно описать основной гармонической составляющей каждого вида качки.

В модели, приведенной на рис. 2, введены обозначения: 1 – блок задания конкретного вида качки, 2 – блок преобразования из инерциальной системы координат в корабельную, 3 – координаты объекта в инерциальной системе координат, 4 – суммирование поправок от каждого вида качки, 5 – блок преобразования из координат XYZ в координаты азимут – угол места (АЗ-УМ), 6 – вывод информации о задающем воздействии для каждой оси телескопа. Модель используется для исследования дополнительных составляющих управляющего сигнала в режиме «стояние в точке» и компенсации действия шести видов качки. С помощью данной модели получены задающие воздействия при каждом виде качки по отдельности, а также их суммарное воздействие на ОПУ.

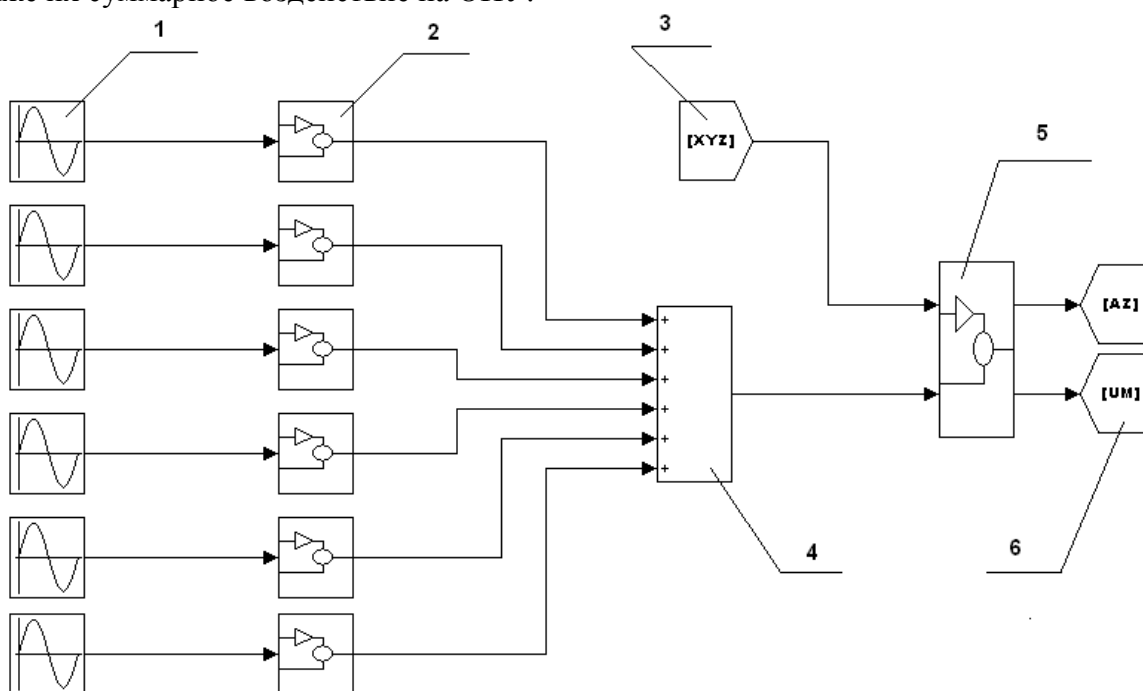


Рис. 2. Модель задающего воздействия при морской качке

На рис. 3 представлены максимальные ускорения задающих воздействий азимутальной оси. С увеличением УМ максимальные ускорения возрастают, причем при АЗ близком к нулю, то есть когда цель находится по курсу корабля, это увеличение более значительно. Указанные предельно возможные ускорения ограничивают рабочий диапазон углов на уровне 75° по УМ при данных параметрах качки.

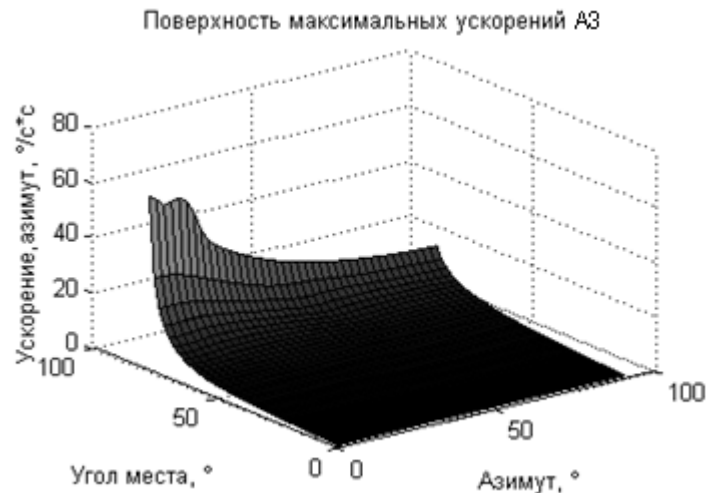


Рис. 3. Поверхность максимальных ускорений АЗ

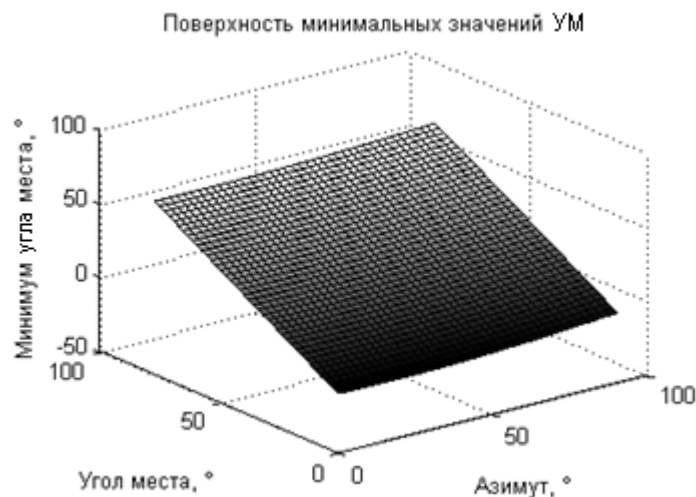


Рис. 4. Поверхность минимальных значений УМ

На рис. 4 представлена поверхность минимальных задающих воздействий для УМ оси в зависимости от различных координат объекта наблюдения. Если угол места цели в инерциальной системе отсчета менее 10° , то в определенные моменты времени ОПУ необходимо отработать отрицательный УМ, что конструктивно невозможно, так как диапазон УМ $0-90^\circ$. Поэтому минимальное задание по УМ должно быть не менее 10° , иначе телескоп не обеспечит непрерывное наблюдение.

Обобщая анализ приведенных графиков, можно заключить, что морская качка с указанными параметрами ограничивает допустимый диапазон возможных положений объекта наблюдения на уровне от 10° до 75° .

Возмущающие воздействия при морской качке

Морская качка оказывает многостороннее влияние на управление опорно-поворотным устройством телескопа. В частности, вращательные виды качки приводят к появлению дополнительных динамических возмущающих воздействий на оси ОПУ. В случае альт-азимутальной монтажки вследствие наличия переменной составляющей момента инерции

АЗ оси (рис. 5) на нее действует момент, вызванный рысканием и зависящий от положения УМ оси.

На УМ ось действует момент, вызванный бортовой и килевой качкой и зависящий от положения АЗ оси, так как от этого зависит угол между осями координат и проекцией УМ оси на горизонтальную плоскость.

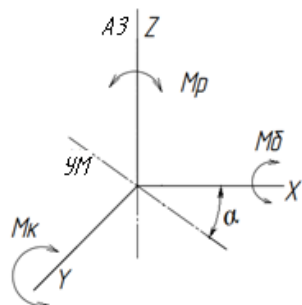


Рис. 5. Возмущения, вызванные качкой

Параметры каждого вида качки различны и зависят от положения осей телескопа, поэтому математическое моделирование возмущающего воздействия необходимо провести в широком диапазоне координат объекта наблюдения. Диапазон азимутальной координаты объекта 0–90°, угломестной – 0–75°.

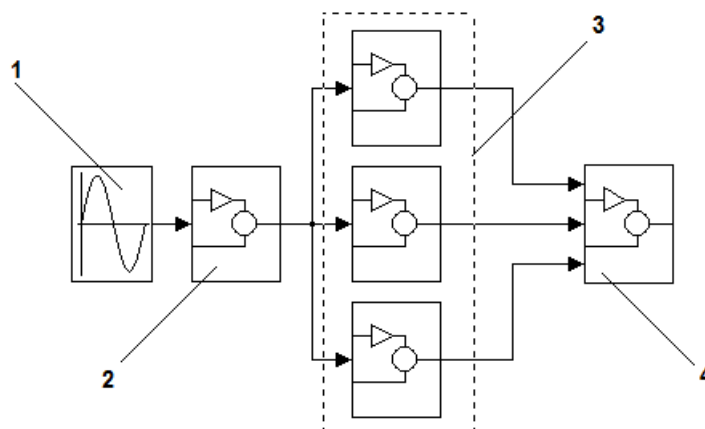


Рис. 6. Структура модели возмущающих воздействий

Структура модели возмущающих воздействий представлена на рис. 6. Блок задания параметров морской качки (1) формирует на выходе шесть сигналов, соответствующих каждому виду качки. Блок задающего воздействия (2) формирует задания для обеих осей с учетом морской качки таким образом, что даже при выполнении указания «стояние в точке» воздействие на систему управления носит сложный характер с множеством гармонических составляющих. Блок формирования возмущающего воздействия (3) определяет величину и характер изменения возмущающих воздействий на осях, вызванных качкой корабля. Блок фиксации результатов моделирования (4) обеспечивает сохранение максимальных, минимальных и средних значений динамических возмущений.

На рис. 7 представлены поверхности максимальных динамических возмущающих моментов, вызванных морской качкой, с учетом переменного момента инерции АЗ оси в зависимости от положения УМ оси. Анализ графика показывает, что максимальные и средние моменты отличаются для различных координат УМ. Максимальный динамический момент 24,5 Нм достигается при УМ 0° и постепенно снижается с увеличением УМ до 21 Нм. Средний момент находится в диапазоне 13,5–15,5 Нм.

На рис. 8 представлены поверхности динамических возмущающих воздействий угломестной оси. Анализ графиков показывает, что максимальный возмущающий момент 12,7 Нм достигается при азимуте около 45° , спадая при азимуте 0° и 90° (так как при этих координатах на УМ ось действует только один вид качки). Средний момент составляет около 5 Нм во всем рассматриваемом диапазоне координат объекта наблюдения. Для рассмотренного ОПУ максимальные значения возмущений составляют 24,5 Нм и 12,7 Нм для АЗ и УМ осей. При учете изменения момента инерции АЗ оси за счет изменения положения УМ максимальный возмущающий динамический момент снижается на 15 % при УМ в 75° .

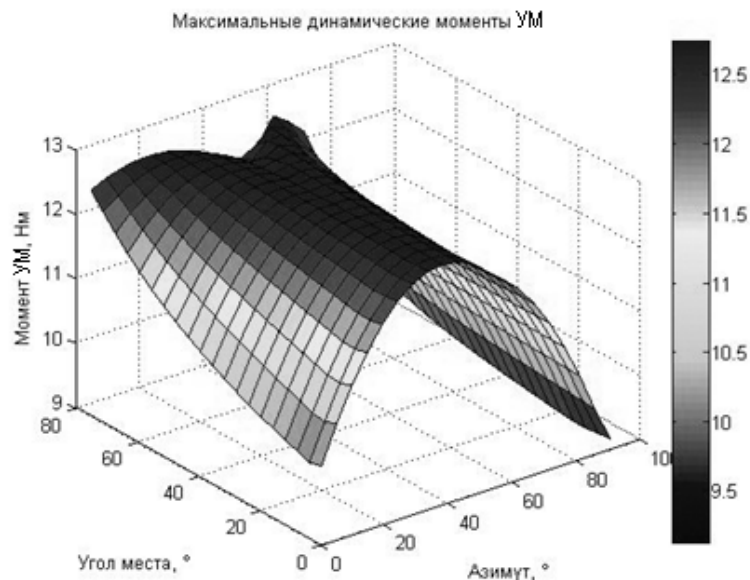


Рис. 7. Максимальные возмущающие динамические моменты АЗ оси

Рассматриваемый объект рассчитан на работу при моменте сухого трения 50 Нм и ветровой нагрузке с амплитудой 60 Нм. Момент дисбаланса УМ оси телескопа ограничивается 20 Нм. Таким образом, дополнительное возмущение по величине соответствует моменту дисбаланса и не превышает момент сухого трения. При моделировании дополнительное возмущение можно не учитывать, либо ограничить его максимальным значением [2, 4].

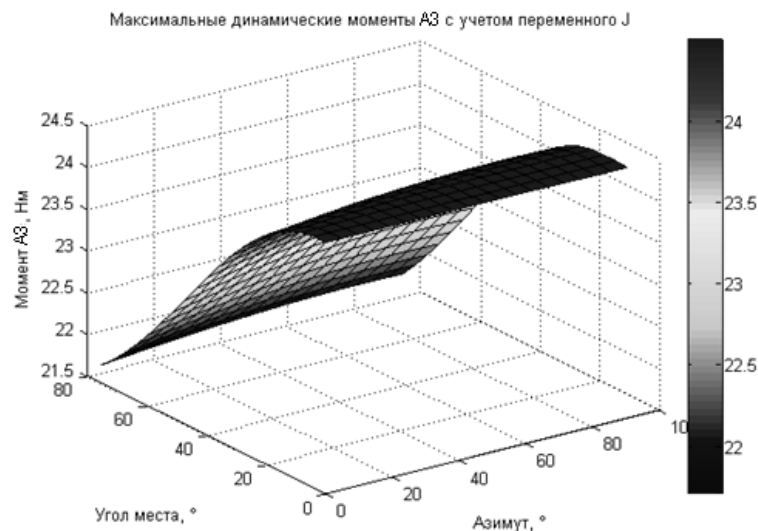


Рис. 8. Максимальные возмущающие динамические моменты УМ оси

С целью подтверждения успешной работоспособности предложенных алгоритмов было проведено экспериментальное исследование разработанной системы управления на стенде

кафедры ЭТ и ПЭМС Университета ИТМО [1]. Быстродействие скоростного контура реальной системы настраивается исходя из условия обеспечения времени переходного процесса в 45 мс при скачке задающего воздействия [3]. Результаты работы системы при обработке задающего воздействия с компенсацией качки представлены на рис. 9 и 10, где показаны графики изменения положения и ошибки по положению при различных углах АЗ оси. Величина среднеквадратичного отклонения (СКО) ошибки по положению при обработке задающего воздействия с компенсацией качки не превышает $2'10''$.

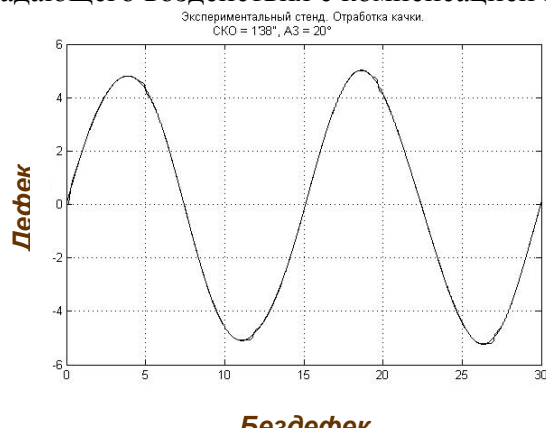


Рис. 9. График задания и положения оси

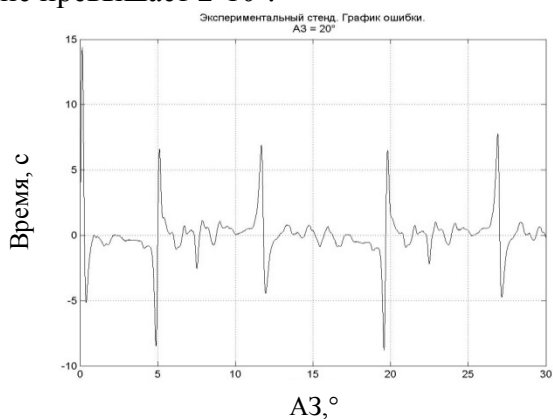


Рис. 10. Ошибка по положению оси

С целью повышения точности обработки морской качки была использована схема комбинированного управления с подачей на контур скорости производной задания по положению.

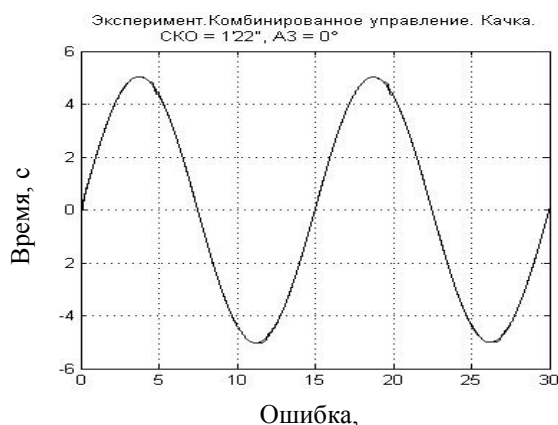


Рис. 11. График задания и положения оси при АЗ цели 0° с комбинированной СУ

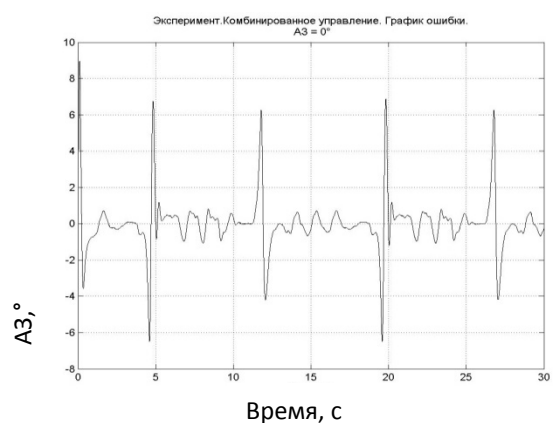


Рис. 12. График ошибки по положению оси при АЗ цели 0° с комбинированной СУ

Результаты работы комбинированной системы управления представлены на рис. 11 и 12. При использовании комбинированного управления СКО ошибки по положению снизилось в 1,5 раза и составило $1'34''$.

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило работоспособность разработанных алгоритмов и возможность их технической реализации.

Заключение

В работе решена актуальная задача построения системы управления телескопа на качающемся основании без использования гиролатформы. Основные результаты:

- проведен анализ характерных особенностей влияния морской качки на формирование задающего воздействия на электропривод осей телескопа;
- разработана математическая модель, позволяющая определить диапазон допустимых координат объекта управления, в котором электропривод телескопа способен выполнять непрерывное наблюдение;

- разработана математическая модель, позволяющая определить величину и характер динамических возмущающих моментов на осях ОПУ, возникающих под влиянием морской качки;
- разработанный комплекс математических моделей может быть использован при проектировании прецизионных приборостроительных комплексов, расположенных на качающемся основании без применения гиостабилизированной платформы.

Публикации

1. Тушев С.А. Исследование возмущающих воздействий, приложенных к осям телескопа на качающемся основании // Вестник ИГЭУ. 2014. № 3. С. 59–64.
2. Тушев С.А. Влияние морской качки на диапазон допустимых координат объекта наблюдения телескопа на палубе корабля // Вестник ИГЭУ. 2013. № 4. С. 54–58.
3. Тушев С.А. Искажение выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя прецизионного электропривода // Вестник ИГУЭ. 2013. № 1. С. 84–87.
4. Тушев С.А. Идентификация и настройка системы управления электропривода азимутальной оси телескопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 56–59.

Литература

1. Патент на изобретение РФ 2009611420 «Программный комплекс СБПЭТ (система быстрого прототипирования электропривода телескопа)», опубл. 12.09.2009.
2. Кенио Т. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. – М., 1989. – 184 с.
3. Кротенко В.В. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства // Известия вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 11. С. 23–30.
4. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). Курс лекций. – СПб., 2010. – 336 с.



Филатова Наталья Николаевна
Естественнонаучный факультет
Кафедра интеллектуальных технологий в гуманитарной сфере
E-mail: natalia_f@inbox.ru

СИСТЕМА «ИНТЕРАКТИВНОЕ СТЕКЛО» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ ДЛЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Н.Н. Филатова

Научный руководитель – доцент Н.Н. Горлушкина

Цель проекта – разработка оптимальной системы «интерактивное стекло» для визуализации информации и вывода ее по запросу человека, осуществляемого посредством движения или прикосновения.

В ходе работы над проектом ставились следующие задачи:

- провести анализ и подобрать необходимые компоненты системы, благодаря которым можно осуществить визуализацию информации и взаимодействие с человеком для вывода информации по его запросу;
- проанализировать методы распознавания жестов руки, основанных на камере глубины, и определить наиболее точного из них;

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

- разработать интерфейс для визуализации информации;
- связать интерфейс с работой жестового контроллера;
- протестировать полученное приложение на различных данных;
- оценить пригодность работы приложения, сравнить с существующими открытыми предложениями.

Система «интерактивное стекло» (интерактивная витрина) – технология, позволяющая потребителю посредством движения либо прикосновения установить коммуникацию с рекламируемым товаром, брендом.

В связи с вхождением в повседневную жизнь человека «интерактивных витрин», предлагается разработка системы «интерактивное стекло» для высшего учебного заведения, как пример взаимодействия человек-компьютер, которое помимо самого компьютера включает в себя связующие компоненты и крупномасштабные габариты. При этом объем информации и многообразие деталей ничем не ограничивается.

В ходе работы был проведен анализ системы «интерактивное стекло», которую можно разделить на две основные подсистемы: проекционную и систему управления визуализацией информации.

В качестве основных инструментов предлагается использовать жестовый контроллер, связующие компоненты, специальное программное обеспечение (ПО). Само приложение должно работать в режиме реального времени.

Система должна обеспечивать:

- визуализацию заложенной информации, в зависимости от сферы применения;
- широкий угол обзора – до 180°;
- яркое и четкое изображение даже в условиях интенсивного искусственного освещения и в яркие солнечные дни;
- точную цветопередачу с любого угла обзора;
- скорость отклика 18–50 мс.

Помимо оборудования и компонентов системы необходимо обратить внимание на грамотную разработку проекта, высококвалифицированный монтаж и настройки, что также влияет на качество работы интерактивной витрины.

При работе системы «интерактивное стекло» рекомендуется использовать обратную (заднюю) проекцию, при этом расстояние от видеопроектора до экрана должно быть не менее 1,5–2 м. Для сокращения расстояния используют специальное расположение зеркал. Вся система управляется с ноутбука или ПК. На больших углах обзора искажений практически нет.

Технология обратной проекции: в основе лежит система проекторов и пленка обратной проекции, которая может быть любой формы и любого размера. Для создания изображения на стеклянную поверхность наносится специальная тонкая пленка, после чего устанавливаются проекторы и другое оборудование. Видеосигнал подается из проектора, который установлен внутри помещения. Изображение получается в результате попадания луча света на слой микролинз, где он распределяется на 180°.

Компоненты системы: мультимедийный проектор, стойка/подвес для проектора, специальная пленка обратной проекции, коммутация, компьютер.

Система управления

Основной задачей при планировании исследования было гармоничное сочетание теоретических проработок и экспериментальных проверок.

Для реализации предлагаемого проекта должны быть тщательно проработаны все компоненты системы: для быстрого потока информации – видео, для работы в режиме реального времени – без задержки отклика системы на распознанный жест.

В данном проекте рассматривается визуализация информации путем отклика при взаимодействии с пользователем при помощи специальных камер глубины (жестовых

контроллеров), которые распознают движения, посредством которых можно управлять визуализацией информации, получая доступ к другим разделам предлагаемого контента.

На данный момент среди разработок жестовых контроллеров самыми известными являются Asus Xtion Pro, Asus Xtion Pro Live, Kinect (1,0, 2,0), Leap Motion, Creative Interactive Gesture Camera (рис. 1). Для системы «Интерактивное стекло» больше всего подходят жестовые контроллеры компаний Asus и Microsoft. Характеристики выбранных на рассмотрение камер представлены в Таблице.

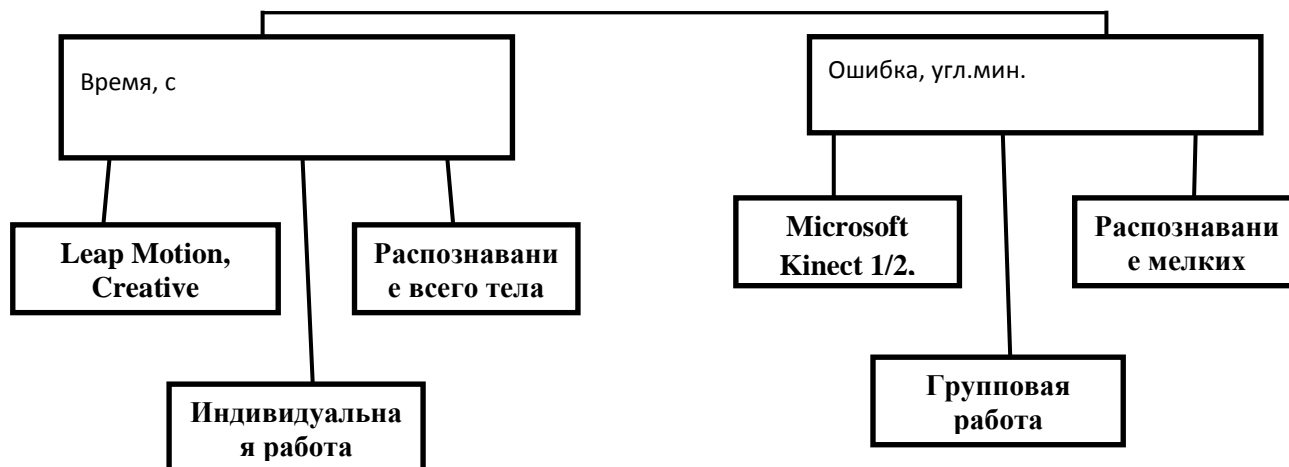


Рис. 1. Сравнение жестовых контроллеров

Таблица 1

Характеристики камер глубины

Характеристика	Камера глубины		
	Microsoft Kinect	ASUS Xtion Pro	ASUS Xtion Pro Live
Энергопотребление	ниже 2,5 Вт	ниже 2,5 Вт	ниже 2,5 Вт
Расстояние использования	Между 1,2 и 3,5 м	между 0,8 и 3,5 м	между 0,8 и 3,5 м
Поле зрения (горизонтальное, вертикальное, диагональное)	57° Н, 43° V, 70° D	58° Н, 45° V, 70° D	58° Н, 45° V, 70° D
Сенсоры	Захват глубины и RGB	Захват глубины	Захват глубины и RGB
Глубина картинки	VGA (640x480): 30 кадров в секунду QVGA (320x240): 30 кадров в секунду	VGA (640x480): 30 кадров в секунду QVGA (320x240): 60 кадров в секунду 1280x1024: 30 кадров в	VGA (640x480): 30 кадров в секунду QVGA (320x240): 60 кадров в секунду 1280x1024: 30 кадров в

		секунду	секунду
Платформа	32 bit (x86) или 64 bit (x64) Двухъядерный 2,66 ГГц или более быстрый процессор	32 bit (x86) или 64 bit (x64) Двухъядерный 2,66 ГГц или более быстрый процессор	32 bit (x86) или 64 bit (x64) Двухъядерный 2,66 ГГц или более быстрый процессор
Поддержка операционной системы	Windows 32/64 bit: XP/Vista/7/8	Windows 32/64 bit: XP/Vista/7/8 Linux Ubuntu 10.10: X86, 32/64bit	Windows 32/64 bit: XP/Vista/7/8 Linux Ubuntu 10.10: X86, 32/64bit
Интерфейс	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0
Программное обеспечение	Software Development Kit (SDK Microsoft)	Software Development Kit (SDK OpenNI)	Software Development Kit (SDK OpenNI)
Язык программирования	C++ / C# (Windows) C++ (Linux); JAVA	C++ / C# (Windows) C++ (Linux); JAVA	C++ / C# (Windows) C++ (Linux); JAVA
Размеры	23 x 4 x 5 см	18 x 3,5 x 5 см	20 x 3,5 x 5 см

Для естественной подачи команд управления интерфейсом используются динамические жесты руки, например такие как: вверх, вниз, левее, поворот. Их легче распознать при неоднородной текстуре фона и различном освещении. Для распознавания динамического жеста и определения положения руки, был использован жестовый контроллер Asus Xtion Pro и приложение HandGKET, разработанное в 2013 г. Пример рабочей области обнаружения руки при помощи данного приложения показано на рис. 2.

В рассматриваемой практической задаче в качестве объекта, совершающего жесты, выступает тело человека, а в качестве ключевых точек – положения рук. Основная задача состоит в классификации жестов, при этом знания точных координат рук в каждый момент времени не требуется. Дополнительно известно, что присутствует один объект-человек.



Рис. 2. Фильтрация положения руки. Зеленая область – результат обнаружения руки по одному кадру

В работе координаты ладони используются для управления положением курсора мыши, поэтому требуется большая точность трекинга ключевых точек. Более того, алгоритм должен работать онлайн, следовательно, траектории объектов и ключевых точек известны только до текущего момента времени. На каждом кадре может присутствовать несколько объектов.

Жесты воспринимаются камерой глубины, распознаются ПО и используются для управления курсором мыши, а также для манипуляций объектами на экране. Для управления требуется небольшое число простых жестов. Выбранный в работе набор включает жесты отличающиеся друг от друга (рис. 3).

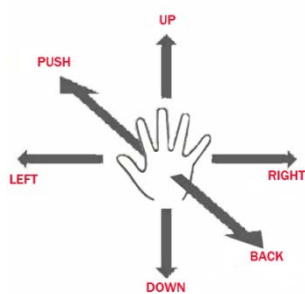
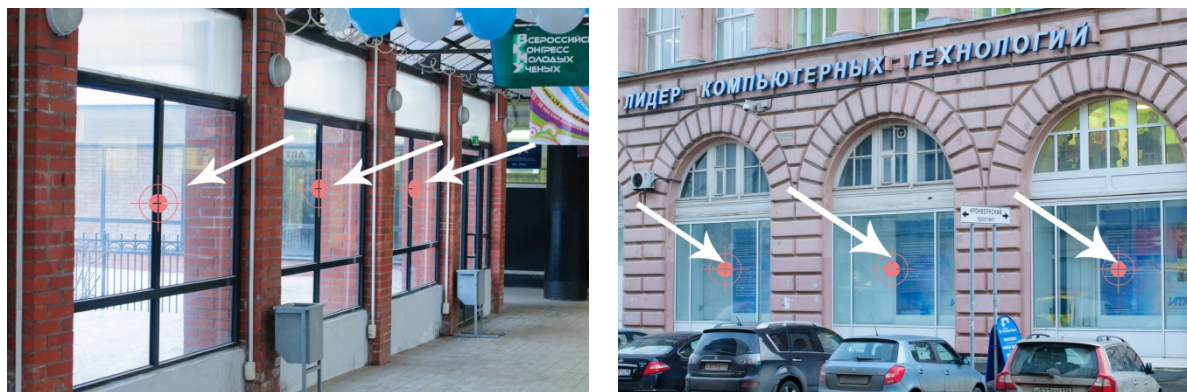


Рис. 3. Набор предлагаемых жестов

Одним из важнейших моментов работы было исследование точности показателей системы. Технический результат будет улучшен при увеличении разнообразия воспринимаемых жестов, включая одновременное восприятие крупных и мелких жестов; улучшении селективности их распознавания; минимизации времени, затрачиваемого на распознавание жеста и выдачу команды устройству для проецирования непосредственно на экран «интерактивного стекла». Данные требования достигаются путем отладки приложения вручную.

Рассматривается пример размещения и использования системы «интерактивное стекло» в Университете ИТМО.

Предлагается визуализация информации по вузу, а также для абитуриентов в момент приемной компании с использованием стекол, находящихся в стенах университета, посредством обратной проекции и, по желанию, прямой. На рис. 4 представлены фотографии университета, где предполагается использовать данную систему.



а

б

Рис. 4. Размещение системы «интерактивное стекло» в Университете ИТМО:
а – прямая проекция; б – основная обратная проекция с выходом на улицу

Контент

В качестве контента может выступать практически любой материал: изображения, рекламные видеоролики, мультимедийные презентации, электронный каталог и т. д. В работе предлагается пример создания интерфейса (рис. 5), который планируется для отображения в полноэкранном режиме.



Рис. 5. Пример интерфейса для высшего учебного заведения

Первоначально страница разделена на четыре равные части. При клике по одной из них, часть раскроется на всю страницу, а остальные исчезнут. Все переходы сопровождаются приятной анимацией. Запуск приложения производится из университета через ноутбук. Далее происходит распознавание руки человека, остановившегося напротив стекла и находящегося в расстоянии от 0,8 до 3,5 м. Для привлечения прохожих, статичная картинка (заставка) меняется на интерфейс сайта. Курсор движется вслед движению руки человека. Затем происходит интуитивное нажатие кнопок путем движения правой руки. Для того, чтобы понять какое движение отвечает за нажатие, рекомендуется сделать небольшие сноски внизу экрана.

Вся анимация осуществляется при помощи специальных классов через JavaScript, PHP, CSS, приложения jQuery. Сама верстка очень гибка и для отображения на разных размерах используются медиа запросы. При клике на одну из частей откроется новый вид страницы с дополнительной информацией.

Заключение

Результаты разработанного интерфейса системы «интерактивное стекло» и его компонентов целесообразно применять как специфическую информационную область для высших учебных заведений на момент работы приемной кампании. В состав интерфейса будет включена структурированная информация по вузу. Использование приложения повысит положительную оценку имиджа университета, его соответствие современным тенденциям в использовании новых информационных систем и технологий.

Для технического вуза, специализирующегося на развитии информационных технологий, система «Интерактивное стекло» предоставляет следующие возможности:

- использование в качестве практики для программистов как инструмент для отладки алгоритмов распознавания жестов;
- обучение студентов университета работе с интерактивным оборудованием, написанию ПО под представленную разработку;
- использование в качестве наглядной демонстрации работ студентов и сотрудников вуза (работа со встроенным ПО и с ПО, разработанным в университете);
- использование в качестве интерактивных информационных стендов (вывод актуальной информации, например, расписания занятий);
- изучение и наглядная демонстрация определения персональных особенностей поведения человека (например, почерка, характерных особенностей жестов и т. д.).

Публикации

1. *Филатова Н.Н.* Технология применения системы «интерактивное стекло» для визуальной подачи информации // 2-я Всероссийская конференция молодых ученых «Интернет: инновационные технологии и инженерные разработки». Сборник тезисов докладов. СПб., 2012.
2. *Филатова Н.Н., Бурлак В.Ф.* Визуализация информации для интерактивных систем в образовании // Наука и образование в современном обществе: вектор развития. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Ч. V. М., 2014. С. 66–67.
3. *Филатова Н.Н.* Использование технологии распознавания жестов для интерактивных систем в образовании // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 3. СПб., 2014. С. 28–29.

Литература

Sohn M. HandGKET (Hand Gesture Key Emulation Toolkit) Manual. 2013.



Шершенков Борис Сергеевич
Факультет пищевых технологий (ИХиБТ)
Кафедра технологии молока и пищевой биотехнологии
E-mail: boris.shershenkov@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ФЕРМЕНТИРОВАННЫХ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Б.С. Шершенков

Научный руководитель – Е.П. Сучкова

В настоящее время ультразвуковые колебания применяются в технологических процессах различных отраслей промышленности для изменения агрегатного состояния вещества, диспергирования, эмульгирования, изменения скорости диффузии, кристаллизации и растворения веществ, а также активизации химических и биохимических реакций.

Благодаря появлению сравнительно недорогого, эффективного и надежного ультразвукового оборудования, позволяющего генерировать ультразвук различной частоты и интенсивности, он получает все более широкое применение и в пищевых производствах. Использование ультразвука в ряде случаев дает возможность повысить производительность труда, сократить энергозатраты, улучшить качество готовой продукции, продлить сроки хранения, а также создать инновационные продукты с новыми потребительскими свойствами.

Одним из наиболее перспективных направлений в области ультразвуковой интенсификации технологических процессов, пока не нашедших свое применение в пищевой промышленности, является ускорение биохимических и ферментативных реакций. Известно, что ультразвук способен ускорять обмен между клетками и питательной средой, уменьшать длительность ферментного гидролиза и поддерживать активность некоторых ферментов, что позволяет стимулировать рост микроорганизмов и увеличивать скорость биосинтеза биологически активных веществ, накопление биомассы, а также ускорить адаптацию клеток к новым условиям [4].

Ультразвуковые методы могут применяться и в молочной промышленности при производстве традиционных и инновационных ферментированных молочных продуктов и биологически-активных добавок, однако, согласно проведенным патентным исследованиям и обзору новейшей литературы, данное направление практически не развивается.

Для исследования влияния ультразвука различной частоты, интенсивности и длительности на метаболическую активность чистых культур микроорганизмов проводилось сравнение образцов культуральной среды, подвергнутых обработке, с контрольными на предмет содержания в них молочной и других кислот, как первичных метаболитов, оказывающих значительное влияние на потребительские свойства продукта. Для количественной оценки метаболизма бактерий был выбран метод измерения титруемой кислотности.

В производстве ферментированных молочных продуктов, служащих незаменимым источником многих ценных биологически-активных веществ в питании человека, наиболее длительной стадией является процесс сквашивания. Эта стадия требует использования значительных объемов производственных площадей, а также высоких энергозатрат на поддержание температурного режима, поэтому сокращение длительности ферментационного

процесса без негативного влияния на потребительские свойства продукции является приоритетным направлением исследований.

Актуальной также является разработка различных видов молочной продукции, нативно обогащенной функциональными веществами и не требующей применения специальных добавок, что переводит ее в сегмент натуральных и экологических продуктов, а также снижает себестоимость и увеличивает доступность некоторых видов лечебной диеты.

Кроме того, одной из основных проблем малых предприятий, остается переработка молочной сыворотки, которая образуется как побочный продукт при изготовлении сыров и творога. Практикуемый в настоящее время слив сыворотки со сточными водами предприятия не только вызывает потери ценных компонентов молока, но и значительно повышает экологическую опасность производства.

Сыворотка содержит большое количество лактозы, микро- и макроэлементов, азотистых веществ, водорастворимых и часть жирорастворимых витаминов молока. Это позволяет рассматривать ее как полноценную питательную среду для культивирования микроорганизмов с целью направленного биосинтеза функциональных компонентов, включая такие комплексные высокомолекулярные вещества, как белки, ферменты и некоторые витамины [2].

Теоретические изыскания показывают, что применение ультразвука при правильном подборе режимов обработки сквашенной смеси после внесения закваски может вызвать активацию процессов молочнокислого брожения и сокращение длительности сквашивания, а также позволит направленно влиять на состав и реологические свойства полученного кисломолочного продукта.

Обработка жидких сред ультразвуком также применяется как один из способов направленного изменения метаболизма в клетках бактерий [5], под действием которого ускоряются реакции механохимического происхождения, имевшие место в озвучиваемой среде до воздействия ультразвука, и инициируются специфические сонохимические реакции, в основе которых лежит механизм разрыва химических связей и образования свободных радикалов [1].

Эффекты ультразвуковой обработки одной частоты и интенсивности различаются для разных видов бактерий из-за особенностей в их строении, размерах и составе ферментов, участвующих в метаболизме, поэтому для подбора режимов был проведен комплексный мониторинг литературных источников. По его результатам для работы выбрана частота обработки в 30 КГц.

Воздействие ультразвука на данной частоте вызывает истончение клеточных стенок и обеспечивает прямой контакт клеточной мембраны с внешней средой, что позволяет высвободить некоторые внутриклеточные соединения без разрушения самой клетки [8].

Выбранная частота обработки соответствует частотам, используемым в промышленных ультразвуковых гомогенизаторах [3]. Таким образом, один и тот же прибор, установленный на производстве, может быть использован для ряда операций, а также с целью интенсификации биотехнологических процессов, что позволит снизить металлоемкость производства и уменьшить необходимые производственные площади, что особенно важно на малых предприятиях по переработке молока.

По результатам теоретических исследований была спроектирована и собрана культивационная установка с возможностью аэрации и ультразвуковой обработки культуральной среды, рассчитанная на шесть образцов (рис. 1).

Воздух с помощью компрессора 1 подается в оснащенный водным фильтром газораспределитель 2, откуда через систему трубок поступает в колбы с культуральной средой 4, оснащенные механическими пеногасителями 3, где пропускается через среду с помощью аэрирующе-перемешивающего устройства 5. Для поддержания необходимой температуры питательных сред – 30 °С – культивационная установка расположена внутри закрытой термостатной камеры 6.

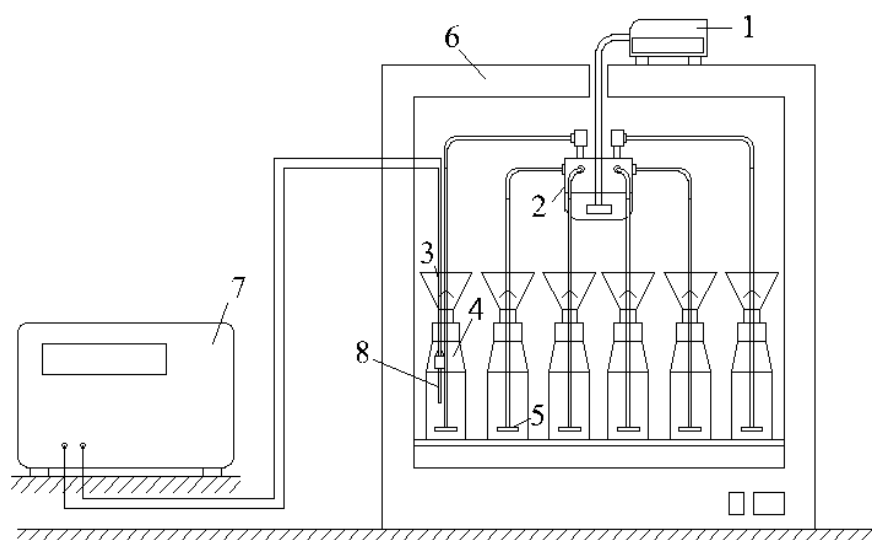


Рис. 1. Принципиальная схема культивационной установки с возможностью аэрации и ультразвуковой обработки культуральной среды

Отверстия на аэрирующе-перемешивающем устройстве расположены таким образом, чтобы при барботировании происходило равномерное распределение воздуха в культуральной жидкости, а также ее частичное перемешивание. Расход воздуха компрессором регулируется с помощью специального воздушного крана, расположенного перед входом в газораспределитель.

Стерильность поступающего в установку воздуха обеспечивается периодическим облучением ультрафиолетом (в течение 6–10 мин лампой высокой мощности) воздуха закрытого помещения, в котором расположена установка.

Ультразвуковая обработка осуществляется с помощью управляемого ультразвукового генератора 7 путем погружения магнитострикционного преобразователя 8 в культуральную среду на заданное время.

Для определения эффекта ультразвуковой обработки на технологические заквасочные культуры, соответствующей режимам работы промышленных гомогенизаторов, был проведен ряд опытов. В качестве контрольной культуры использовалась лиофилированная заквасочная смесь термофильных молочнокислых бактерий Christian Hansen с интенсивным кислотонакоплением. Бактерии были предварительно оживлены и затем культивировались в восстановленном обезжиренном молоке в течение 4 ч при постоянной температуре 40°C.

Обработка ультразвуком проводилась дважды: в начале культивирования и через 2 ч после его начала – с помощью лабораторного гомогенизатора с магнитострикционным преобразователем на частоте порядка 30 КГц. Длительность обработки составляла 2 мин, общая мощность для разных образцов варьировалась от 2 до 8 Вт.

После окончания культивирования проводился анализ титруемой кислотности сквашиваемого молока как одного из ключевых показателей готовности продукта и метаболической активности микроорганизмов. При этом выяснено, что изменение общей мощности ультразвукового воздействия оказывало существенное влияние на кислотонакопление культивируемых микроорганизмов, а максимальный эффект в диапазоне исследуемых режимов наблюдался при мощности обработки 5-6 Вт.

Следующим этапом исследования было определение оптимальной длительности ультразвуковой обработки. Культивация проводилась при аналогичных условиях, общая мощность обработки для разных образцов варьировалась от 5 до 6 Вт, а длительность обработки составляла от 1 до 3 мин. Результаты приведены в Табл. 1.

При этом выяснено, что изменение общей мощности ультразвукового воздействия оказывало существенное влияние на кислотонакопление культивируемых микроорганизмов.

Максимальный эффект в диапазоне исследуемых режимов наблюдался при мощности обработки 5 Вт и длительности озвучивания 3 мин. Титруемая кислотность образца при этом превысила кислотность контрольного, не подвергавшегося обработке, более чем на 8 %, что указывает на снижение общей длительности сквашивания до требуемой кислотности сгустка.

Таблица 1

Титруемая кислотность образцов при различных условиях обработки ($^{\circ}\text{T}$) и сравнение с контролем (%)

Длительность озвучивания	Мощность ультразвукового воздействия							
	Контроль	2 Вт	3 Вт	4 Вт	5 Вт	6 Вт	7 Вт	8 Вт
1 мин	68±2	-	-	-	72±2	72±1	-	-
2 мин		70±2	72±2	73±1	72±2	71±2	71±3	73±3
3 мин		-	-	-	74±2	72±2	-	-

Полученный в результате сквашивания кисломолочный продукт соответствует требованиям Федерального закона Российской Федерации от 12 июня 2008 г. № 88-ФЗ «Технический регламент на молоко и молочную продукцию» и требованиям ГОСТ Р 52095-2003 «Простокваша. Технические условия» и может быть рекомендован к производству в качестве более экономичного аналога вышеуказанной молочной продукции.

Итак, ультразвуковые методы могут применяться для интенсификации процессов молочнокислого брожения и ускорения кислотонакопления в производстве кисломолочных напитков, сыров и творога, а также при производстве функциональной продукции и биологически-активных добавок к пище на базе малых предприятий, для чего можно использовать уже имеющееся на молочных предприятиях ультразвуковое оборудование.

Для ультразвуковой обработки в условиях производства предложены следующие технологические решения.

Применение ультразвуковых гомогенизаторов, которые монтируются в трубопровод и могут быть размещены на любом этапе технологического потока благодаря системе клапанов и вентилях. Благодаря этому технологические стадии гомогенизации пастеризованного молока и ультразвуковой биоинтенсификации сквашиваемой смеси могут быть выполнены на одном оборудовании, что позволит значительно снизить стоимость внедрения предлагаемой технологии.

Применение универсальных ультразвуковых установок, оборудованных каскадными излучателями (суперкавитаторами), смонтированными внутри резервуаров для сквашивания. Такое решение обеспечит равномерную ультразвуковую обработку ферментируемой смеси, а также, благодаря воздействию ультразвука, позволит достигнуть разрушения сгустка, образующегося при производстве молочнокислых продуктов резервуарным способом, что исключит установку дополнительных перемешивающих устройств.

Определены также рекомендуемые режимы ультразвуковой обработки для производства молочнокислой продукции на основе термофильных микроорганизмов: мощность обработки 5 Вт на частоте 30 КГц при длительности озвучивания 3 мин в начале и каждые 2 ч культивирования.

Предлагаемая технология ультразвуковой биоинтенсификации направлена прежде всего на малые предприятия молочной промышленности, заинтересованные в повышении производственной эффективности и внедрении экологически чистых технологий переработки молока, а также освобождении дополнительных производственных площадей для биотехнологической переработки вторичных молочных продуктов, таких как молочная сыворотка, для повышения экологической безопасности производства.

Себестоимость единицы продукции и экономический эффект ультразвуковой обработки зависит от применяемого сырья и заквасочных культур. Эксперименты показывают, что при правильном подборе режимов технология позволит уменьшить

длительность производства любого кисломолочного продукта и исключить этап предварительного оживления лиофилизированной закваски, что понизит себестоимость продукции ориентировочно на 10–20 % по сравнению с существующей, благодаря чему повысится ее конкурентоспособность как среди традиционных молочных продуктов, так и в секторе функциональных и пробиотических продуктов питания.

Направленная ультразвуковая модуляция синтеза биологически активных веществ в процессе ферментации позволит получить новые виды функциональной и лечебной продукции с минимизацией затрат на сырье и увеличением ее доступности для рядового потребителя.

Публикации

1. Сучкова Е.П., Шершенков Б.С. Ультразвуковая модуляция метаболической активности *Propionibacterium freudenreichii* subsp. *shermanii* при получении пищевых продуктов, обогащенных витамином В12 [Электронный ресурс] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 4 (18). URL: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/10790.pdf> (дата обращения: 04.02.2015).
2. Сучкова Е.П., Шершенков Б.С. Технологические решения при получении обогащенной витамином В12 молочной сыворотки [Электронный ресурс] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2 (16). URL: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/10682.pdf> (дата обращения: 04.02.2015).
3. Shershenkov B.S., Suchkova E.P., Baranenko D.A. Effect of ultrasonic treatment on metabolic activity of *Propionibacterium shermanii*, cultivated in nutrient medium based on milk whey // *Agronomy Research*. 2014. Vol. 12. No 3. P. 813–820.

Литература

1. Акопян Б.В., Ершов Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами: Учеб. пособие. М., 2005. – 224 с.
2. Евдокимов И.А., Храпцов А.Г., Нестеренко П.Г. Современное состояние переработки молочной сыворотки // *Молочная промышленность*. 2008. № 11. С. 36–40.
3. Зверев С.В., Лобанов А.В. Ультразвуковая техника в молочной промышленности // *Переработка молока*. 2005. № 1 (63). С. 10.
4. Chisti Y. Sonobioreactors: using ultrasound for enhanced microbial productivity // *Trends in Biotechnology*. 2003. Vol. 21. No 2. P. 89–93.
5. Mason T.J., Lorimer J.P. *Applied Sonochemistry: Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing*. 2002. – 293 pp.

Сборник трудов аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под редакцией проф. В.О. Никифорова. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 236 с.

СБОРНИК ТРУДОВ АСПИРАНТОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ
ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Под редакцией проф. В.О. Никифорова

Дизайн обложки А.В. Чуркова

Редакторы:

А.В. Бутина, И.А. Лапшина, А.В. Рябчикова

Корректор Е.И. Клейменова

Верстка И.А. Лапшина

Лицензия ИД № 00408 от 5.11.2013

Подписано в печать 30.04.2015

Заказ №3289 Тираж 100 экз.

ISBN 978-5-7577-0496-8

ISBN 978-5-7577-0496-8



9 785757 704968



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО