

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

| | | |
|---|--|-----|
| Методология подбора оптимального способа крепления линз при автоматизированном проектировании | Колтаков А.К., Толстоба Н.Д. | 1 |
| Модель эллипсометрического исследования характеристик оптических клеевых соединений | Александров М.Е., Нагибин Ю.Т., Трофимов В.А., Шванова М.Л. | 4 |
| Определение потерь излучения на оптических элементах методами эллипсометрии и импульсной фотометрии | Александров М.Е., Данилова Т.М., Беломутская П.С., Храмцовский И.А. | 9 |
| ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА | | |
| Формирование и визуализация 3D-изображений микрообъектов по серии видеок кадров с изменяемой фокусировкой | Аверкин А.Н., Потапов А.С., Рожков А.С. | 12 |
| Метод подсчета эритроцитов на изображениях мазков крови | Дырнаев А.В. | 17 |
| Спектрально-временная эволюция электрического поля терагерцового импульса при дифракции Фраунгофера на щели | Куля М.С., Грачев Я.В., Городецкий А.А., Беспалов В.Г. | 22 |
| ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ | | |
| Исследование физических процессов в импульсной ксеноновой лампе при ограничении тока накачки внешней электрической цепью | Мандрыко Ю.А., Тогатов В.В. | 28 |
| Универсальный аналитический комплекс на основе атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой и генератора гидридов | Быковская Е.А., Максакова И.Б. | 34 |
| АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ | | |
| Следящая система комбинированного управления | Никифоров В.О., Лукьянова Г.В. | 39 |
| Основные особенности структуры электромагнитных полей, создаваемых в нижней ионосфере низкочастотными приземными антеннами. Результаты численных расчетов | Рыбачек С.Т., Белянский М.А. | 44 |
| Комбинированный метод анализа сигналов малозаметных радиолокационных станций с использованием их частотно-временных представлений | Коротков А.В. | 49 |
| Формирование спектра сингулярных чисел квадратной матрицы простой структуры | Акунов Т.А., Бирюков Д.С., Дударенко Н.А., Полякова М.В., Ушаков А.В. | 53 |
| КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ | | |
| Анализ влияния дефокусировки и шума на качество цифрового изображения | Беззубик В.В., Белащенко Н.Р., Никифоров В.О. | 59 |
| Метод построения конечных автоматов верхнего уровня для управления моделью беспилотного самолета на основе обучающих примеров | Казаков С.В., Царев Ф.Н., Шальто А.А. | 64 |
| Региональная демографическая модель распространения наркомании | Митягин С.А., Захаров Ю.Н., Бухановский А.В., Слоот П.М.А. | 68 |
| Надежность дублированных вычислительных комплексов | Богатырев В.А., Баикова С.А., Беззубов В.Ф., Полякова А.В., Котельникова Е.Ю., Голубев И.Ю., Румянцев А.С. | 74 |
| Быстрый последовательный целочисленный делитель по основанию 4 | Румянцев А.С. | 78 |
| ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И БИМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ | | |
| Определение параметров шероховатости и дефектация поверхностей деталей воздушного судна с применением спиральных пучков лазерного излучения | Павлов П.В., Петров Н.В., Малов А.Н. | 84 |
| Спектр поглощения восстановленной формы никотинамидадениндинуклеотида по данным эксперимента и квантово-химического расчета | Конькова Е.П. | 88 |
| Ранняя диагностика кариеса твердых тканей зубов с помощью лазерного излучения терагерцового диапазона | Езерская А.А., Романов И.В., Смолянская О.А., Грачев Я.В. | 92 |
| МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ | | |
| Архитектура и технологии формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона | Маслобоев А.В., Шишаев М.Г. | 98 |
| СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | | |
| Разработка и применение методики комплексного автоматизированного кинематического, динамического и прочностного анализа для решения задач машиностроения | Терлецкая А.М., Райц Н.Р., Лимарева И.Г., Фомичева Е.К., Мурых Е.Л. | 104 |
| ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА | | |
| Применение оценочных метрик для анализа технологической подготовки производства | Куликов Д.Д., Яблочников Е.И. | 109 |
| Организация единого информационного пространства виртуального предприятия | Афанасьев М.Я., Грибовский А.А. | 113 |
| НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ | | |
| Адаптивность в тренажерах | Сергеев С.Ф. | 118 |
| Генерация тестов для олимпиадных задач по теории графов с использованием эволюционных стратегий | Буздалов М.В. | 123 |
| ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ | | |
| Архитектура программной реализации автоматизированной торговой системы, использующей технический анализ | Лукашев А.В. | 128 |
| Численный анализ влияния точности прогноза пассажирского спроса на эффективность продаж авиабилетов с учетом сверхлимитного бронирования | Мозговая К.А., Яблочкина М.В., Фридман Г.М. | 132 |
| КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ | | |
| Автоматизация формирования списков литературы диссертаций сведениями ВИНТЕХ | Мельников В.Г., Касикова П.В., Белинка М.А. | 138 |
| Трехмерное моделирование печатного узла | Кузнецова О.В., Романова Е.Б. | 139 |
| Оптимизация вычислительных систем с объединением межсетевых экранов в отказоустойчивые кластеры | Богатырев В.А., Попова М.В., Богатырев С.В., Кудрявцева В.Ю., Фокин С.Б. | 140 |
| Бесконтактная параметрическая идентификация вращающихся машин | Сеферян А.Е., Топчий А.Ю., Нестеров А.В. | 142 |
| Использование градиентного бустинга деревьев решений для предсказания стабильности водородной связи в белке | Дружков П.Н., Золотых Н.Ю. | 144 |
| Контекстный подход к реализации интеллектуальных систем | Бессмертный И.А., Балгайракова А.С., Ковбаско Д.В. | 145 |



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР.....

доктор технических наук, профессор В.О. Никифоров

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Телефон / факс (812) 233 45 51
<http://books.ifmo.ru/ntv/>
E-mail: karmanov@mail.ifmo.ru

УДК 681.7.06.07

МЕТОДОЛОГИЯ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ ЛИНЗ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

А.К. Колпаков, Н.Д. Толстога

Рассмотрен выбор оптимального способа крепления оптических деталей при автоматизированном конструировании. Этот процесс требует формализации и построения соответствующей математической модели, реализующей выбор решения. Предложена методика подбора оптимального крепления.

Ключевые слова: методология, выбор оптимального решения, способ крепления, автоматизация конструирования.

Введение

Одним из приоритетных научных направлений оптической отрасли является автоматизация конструирования отдельных узлов оптического прибора.

Как известно, тип оправы является определяющим для таких конструктивных параметров оптической детали, как размеры фасок и полный диаметр. Таким образом, выбор оправ можно рассматривать как процесс синтеза некоторых входных данных, их анализ и решение в виде выборки конечных данных. Данный процесс можно структурировать и подвергнуть алгоритмизации, особенно в контексте автоматизации конструирования.

Описание модели

К основным способам крепления линз и других круглых оптических деталей относятся крепление завальцовкой, крепление приклеиванием, крепление резьбовым кольцом. При необходимости, когда приходится учитывать особые условия и требования, связанные с габаритными размерами, назначением, условиями эксплуатации оптических деталей, могут использоваться вспомогательные способы крепления – проволочным кольцом, прижимными планками, накладным кольцом, специальными элементами или специальной конструкцией оправы [1]. Одной из первоочередных задач при конструировании данного узла оптического прибора является выбор способа крепления линз.

Применение математических методов при принятии решений предполагает построение подходящей математической модели, в формализованном виде представляющей проблемную ситуацию, т.е. ситуацию выбора решения. В многокритериальной задаче, которой является выбор типа крепления, сравнение решений по предпочтительности осуществляется не непосредственно, а при помощи заданных числовых функций, называемых критериями [2].

При реализации математической модели выбора оптимального конструктивного решения возможно применение методов принятия решения в условиях неопределенности по нижеперечисленным критериям [3].

Критерий максимина (критерий Вальда). По этому критерию лица, принимающие решения, выбирают стратегию, гарантирующую максимальное значение наихудшего выигрыша. Примером тому может служить выбор оправы, гарантированно удовлетворяющей всем требованиям к креплению линзы, но не всегда самой технологичной.

В соответствии с критерием Вальда в каждой строке матрицы решений фиксируются альтернативы с минимальным значением оценочной функции. Альтернативе A с максимальным значением из всех минимальных отдается приоритет.

Критерий максимакса. В соответствии с этим правилом выбирается альтернатива с наивысшим достижимым значением оцениваемого показателя. При этом лицо, принимающее решение, не учитывает риска от неблагоприятного изменения окружающей среды (оправа, отлично удовлетворяющая какому-либо требованию, может сводить на нет это преимущество вкупе с другим требованием).

В соответствии с критерием максимакса находится наивысшее достижимое значение показателя по формуле

$$A = a_j \max_j \max_i \Pi_{ij},$$

т.е. выбирается наибольшее значение из максимального значения для каждой строки.

Критерий минимакса (критерий Севиджа). В отличие от критерия максимина, критерий минимакса ориентирован на минимизацию не столько потерь, сколько сожалений по поводу упущенной выгоды. Оценка по критерию Севиджа рассчитывается по формуле

$$\min \max \Pi = \min_i [\max_j (\max_i X_{ij} - X_{ij})]$$

и состоит из нескольких этапов.

1. Сначала определяются отклонения от лучшего результата каждой отдельной графы матрицы решений по формуле $\max_i X_{ij} - X_{ij}$, которые образуют матрицу сожалений (см. табл. 1), так как ее элементы – это недополученная выгода от неудачно принятых решений, допущенных из-за ошибочной оценки.
2. Для каждой строчки матрицы сожалений находится максимальное значение.
3. Выбирается решение, при котором максимальное сожаление будет меньше других.

Критерий Гурвица. Этот критерий связывает критерии максимакса и максимина через максимум минимальных значений альтернатив.

Оптимальная альтернатива по критерию Гурвица рассчитывается по формуле (3), где α – коэффициент оптимизма ($\alpha = 0 \dots 1$).

$$\alpha \cdot \min q_{ij} + (1 - \alpha) \cdot \max q_{ij} .$$

Можно отметить, что при $\alpha = 1$ альтернатива выбирается по критерию максимакса, при $\alpha = 0$ – по критерию максимина. Общепринятая практика для учета риска – принятие коэффициента оптимизма 0,3 [3]. Множитель $\min q_{ij}$ представляет собой оценку по критерию максимина, а $\max q_{ij}$ – по критерию максимакса. Наибольшее значение целевой величины и определяет необходимую альтернативу.

При принятии решения в условиях неопределенности критерий Гурвица учитывает риск принятия ошибочного решения, в отличие от критериев максимина и максимакса [4]. Этот момент немаловажен в оптическом приборостроении, так как может снизить стоимость принятия не самого оптимального типа крепления (выражающуюся, например, в цене, весе, габаритах и т.д.). Учитывая сказанное, за основу выбора типа оправы примем именно этот критерий при реализации алгоритма в программном комплексе. Далее рассматривается методика выбора конструкции крепления линзы, основанная на матрице оценочных функций и многокритериальном выборе.

Реализация математической модели

Настоящая работа рассматривает метод решения вопроса о многокритериальном выборе типа крепления. Для реализации модели была взята за основу многопараметрическая шкала для оценки из [5]. Для удобства построения математической модели используется шкала оценок от 0 до 9, где 0 соответствует тому, что тип крепления не удовлетворяет требуемому условию, 9 – максимально ему подходит. Верификация критериев и их полнота выходит за рамки настоящей работы и является тематикой отдельного рассмотрения. Следует подчеркнуть, что оценки в общей сводной таблице являются не константами, а изменяемыми параметрами, сама же таблица служит опорой для построения модели принятия решения. В практическом применении инженеры смогут вносить изменения в предлагаемый вариант оценок тех или иных критериев, добавлять и удалять критерии по своему усмотрению. Таким образом, предполагается создать масштабируемую модель, не завязанную на жестких значениях.

Для предварительной оценки работы и применимости математической модели принятия оптимального решения она была построена в пакете Microsoft Excel. Для сравнения результатов выбора были применены все вышеперечисленные критерии принятия решения. Данная модель была протестирована на множестве вариантов. В работе приводится пример для двух линз с различными характеристиками и требованиями к установке.

- Линза 1. Радиусы $R1 = 80$ мм, $R2 = -35$ мм; толщина $d = 5$ мм; диаметр $D = 20$ мм. Необходимые условия – допуск на центрирование 0,02 мм, автоматизация сборки, минимальность габаритов, разборная конструкция, компенсация термических деформаций.
- Линза 2. Радиусы $R1 = 500$ мм, $R2 = 350$ мм; толщина $d = 15$ мм; диаметр $D = 270$ мм. Необходимые условия – юстировка в процессе сборки, разборная конструкция, допуск на центрирование 0,06 мм.

Из общей многопараметрической шкалы производится выборка только тех критериев, которые сохраняются в исходной задаче: малый диаметр, точное позиционирование, автоматизация сборки, минимальность габаритов, разборная конструкция и компенсация термических деформаций для первой линзы, большой диаметр, юстировка в процессе сборки, разборная конструкция и невысокие требования к точности крепления для второй. Выборка значимых критериев с оценками сведена в подтаблицу «матрица решений» (табл. 1 и 2). Во второй части таблицы приведены оценочные функции по рассматриваемым способам принятия решения.

Оптимальные варианты крепления линз по каждому из критериев обозначены в таблицах знаками «*».

| Матрица решений | | | | | | | Критерии | | | |
|---|-----------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------|--|
| Тип крепления | Условия | | | | | | максимакса $\max(X_{ij})$ | максимина $\min(X_{ij})$ | Гурвица | |
| | Линза малого диаметра | Минимальность габаритов | Разборная конструкция | Компенсация термических деформаций | Автоматизация сборки узла крепления | Повышенная точность крепления | | | a | $G = a \cdot \min q_{ij} + (1 - \alpha) \max q_{ij}$ |
| Завальцовкой | 8 | 8 | 0 | 3 | 7 | 9 | 9 | 1 | 0,3 | 6,6 |
| Приклеиванием | 8 | 9 | 0 | 2 | 9 | 2 | 9 | 1 | 0,3 | 6,6 |
| Резьбовым кольцом | 3 | 5 | 9 | 9 | 5 | 5 | 9* | 3* | 0,3 | 7,2* |
| Проволочным кольцом | 8 | 7 | 7 | 2 | 3 | 1 | 8 | 1 | 0,3 | 5,9 |
| Пружинящими планками | 1 | 4 | 6 | 7 | 2 | 4 | 7 | 1 | 0,3 | 5,2 |
| Накладным кольцом | 1 | 2 | 9 | 9 | 0 | 6 | 9 | 1 | 0,3 | 6,6 |
| Матрица сожалений: $\max(\max X_{ij} - X_{ij})$ | | | | | | | Критерий Сэвиджа | | | |
| Завальцовкой | 1 | 1 | 9 | 6 | 2 | 0 | 9 | | | |
| Приклеиванием | 0 | 0 | 9 | 7 | 0 | 7 | 9 | | | |
| Резьбовым кольцом | 6 | 4 | 0 | 0 | 4 | 4 | 6* | | | |
| Проволочным кольцом | 0 | 1 | 1 | 6 | 5 | 7 | 7 | | | |
| Пружинящими планками | 6 | 3 | 1 | 0 | 5 | 3 | 6* | | | |
| Накладным кольцом | 8 | 7 | 0 | 0 | 9 | 3 | 9 | | | |

Таблица 1. Выбор оптимального решения, вариант 1

| Матрица решений | | | | | Критерии | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------|--|
| Тип крепления | Условия | | | | максимакса $\max(X_{ij})$ | максимина $\min(X_{ij})$ | Гурвица | |
| | Линза большого диаметра | Разборная конструкция | Пониженная точность крепления | Юстировка в процессе сборки | | | a | $G = a \cdot \min q_{ij} + (1 - \alpha) \max q_{ij}$ |
| Завальцовкой | 0 | 0 | 2 | 5 | 5 | 1 | 0,3 | 3,8 |
| Приклеиванием | 3 | 0 | 7 | 8 | 8 | 1 | 0,3 | 5,9 |
| Резьбовым кольцом | 7 | 9 | 4 | 0 | 9 | 1 | 0,3 | 6,6 |
| Проволочным кольцом | 0 | 7 | 9 | 3 | 9 | 1 | 0,3 | 6,6 |
| Пружинящими планками | 6 | 6 | 6 | 0 | 6 | 1 | 0,3 | 4,5 |
| Накладным кольцом | 9 | 9 | 4 | 5 | 9* | 4* | 0,3 | 7,5* |
| Матрица сожалений: $\max(\max X_{ij} - X_{ij})$ | | | | | Критерий Сэвиджа | | | |
| Завальцовкой | 5 | 5 | 3 | 0 | 5 | | | |
| Приклеиванием | 5 | 8 | 1 | 0 | 8 | | | |
| Резьбовым кольцом | 2 | 0 | 5 | 9 | 9 | | | |
| Проволочным кольцом | 9 | 2 | 0 | 6 | 9 | | | |
| Пружинящими планками | 0 | 0 | 0 | 6 | 6 | | | |
| Накладным кольцом | 0 | 0 | 5 | 4 | 5* | | | |

Таблица 2. Выбор оптимального решения, вариант 2

Из представленных таблиц видно, что для первой линзы оптимальным по всем критериям является способ крепления резьбовым кольцом. Для второй линзы наилучшим вариантом является крепление накладным кольцом. Критерий Севиджа предлагает для первой линзы в качестве альтернативы крепление пружинящими планками, однако ввиду большей технологичности способа крепления резьбовым кольцом данная альтернатива является менее предпочтительной. Следует отметить, что в обоих примерах для критерия максимакса не учитываются некоторые способы креплений, которые также дают итоговое максимальное значение в силу того, что они не удовлетворяют исходным требованиям к установке деталей (оценочная функция по некоторым критериям равна нулю).

Заключение

Экспериментальная проверка построенных моделей показала, что они согласуются с общепринятой практикой выбора метода крепления в указанных условиях. Метод матрицы решений в ее автоматизированном варианте моделирует процесс конструирования, устраняя сложность принятия решения при увеличении числа требований к креплению.

Рассматриваемая в работе методология выбора оптимального способа крепления развивает идеи В.В. Кулагина в виде предложенной им таблицы принятия решения. Описанная методология разрабатывалась в контексте автоматизации, так как именно в нем она представляет наибольшую ценность. В рамках автоматизированного проектирования оптического прибора алгоритмизация данного этапа является необходимым звеном в цепочке (следующим звеном в которой идет автоматический выбор недостающих конструктивных данных детали), без которого невозможно будет создать целостный процесс. Таким образом, математическая модель выбора оптимального решения может успешно внедряться в различные САПР для автоматизированного конструирования узлов с разными способами крепления оптических элементов.

В дальнейшем планируется создание программы для системы автоматизированного конструирования КОМПАС, одной из функций которой будет являться рассмотренная в настоящей работе методика выбора оптимального крепления оптической детали.

Литература

1. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учебное пособие. – СПб: Политехника, 2007. – 579 с.
2. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 256 с.
3. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций. – 7-е изд.: Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2005. – 912 с.
4. Соснин П.И. [личный сайт]: Теория игр и принятие решений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://old.ulstu.ru/people/SOSNIN/umk/Decisions_Support/metod/game.htm, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 13.11.10).
5. Кулагин В.В. Основы конструирования оптических приборов: Учебное пособие для приборостроительных вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 312 с.

Колпаков Андрей Константинович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, group6300@gmail.com

Толстова Надежда Дмитриевна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, nadinet@aco.ifmo.ru

УДК 535.551

МОДЕЛЬ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

М.Е. Александров, Ю.Т. Нагибин, В.А. Трофимов, М.Л. Шванова

Рассмотрена возможность выполнения исследований напряженного состояния клеевых соединений оптических деталей с помощью эллипсометра компенсационного типа, работающего по схеме PCSA. Описывается математическая модель эллипсометрического исследования наведенного двулучепреломления в соединительном слое, вызванного интегральным эффектом фотоупругости.

Ключевые слова: клеевое соединение, напряженное состояние, эллисометрия, соединительный слой, наведенное двулучепреломление, фотоупругость.

Введение

В приборостроении широко используются оптические методы соединения оптических деталей. К ним относятся клеевой метод, метод оптического контакта, метод глубокого оптического контакта и спе-

кание. Эти методы предназначены для прочного соединения оптических деталей, при котором не происходит искажение трансформируемого склеиваемыми элементами изображения. Совершенствование методов соединения связано с тем, что каждое из них в той или иной степени вызывает так называемое напряженное состояние соединяемых деталей. Напряженное состояние проявляется в виде эффекта фотоупругости, связанного с изменением показателя преломления материала соединяемых деталей в области контакта, вызванного механическими напряжениями. Одним из распространенных способов исследования напряженного состояния оптических изделий является полярископия. Наблюдение картины интерференции поляризованного света, прошедшего исследуемый объект, позволяет выявить пространственную неоднородность его показателя преломления [1]. Такая методика удобна для качественной диагностики изделия. Количественная оценка имеет низкую точность и высокую трудоемкость.

Причины напряженного состояния оптических соединений

Причиной напряженного состояния могут служить:

- в случае оптического контакта – погрешности формы и чистота обработки соединяемых поверхностей;
- в случае клеевого соединения – неоднородность показателя преломления клея и механические напряжения, вызванные его высыханием;
- в случае спекания – остаточные механические напряжения в материале, вызванные термообработкой.

Рассмотрим напряженное состояние клеевого соединения, которое может быть представлено в виде двух стеклянных плоскопараллельных пластинок, соединенных между собой слоем оптического клея (рис. 1).

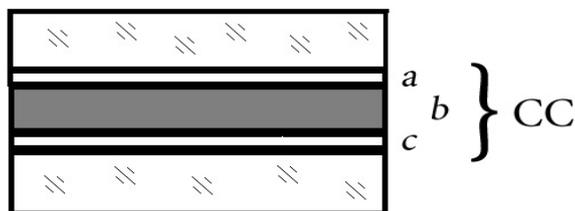


Рис. 1. Клеевое соединение в виде двух стеклянных плоскопараллельных пластинок, соединенных между собой слоем оптического клея «Соединяющий»: а – соединительный слой верхней стеклянной пластинки; б – соединительный клеевой слой; с – соединительный слой нижней стеклянной пластинки

Поверхностный слой пластинок вследствие механической обработки имеет показатель преломления и структуру поверхности, отличные от массива. Неоднородность этого слоя в сочетании с неоднородностью свойств оптического клея, связанной, в частности, с неоднородностью его объемного высыхания, позволяет воспользоваться моделью, где элемент элементарной поверхности может быть представлен в виде сферической оболочки (рис. 2).

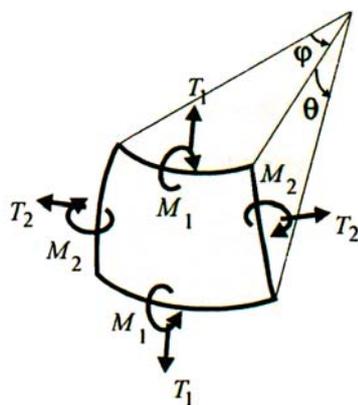


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние элементарного элемента оптического соединения

Напряженное состояние такого элемента содержит две составляющие: основное напряженное состояние и краевой эффект [1]. Первое определяет состояние всей поверхности элемента, второе, как правило, связано с локальными эффектами и имеет затухающий характер. Осесимметричный изгиб сферической поверхности характеризуется следующими соотношениями:

$$T_1 = T_1^*, \quad T_2 = T_2^* + T_2^k, \quad M_1 = M_1^k, \quad M_2 = M_2^* + M_2^k, \quad \Theta = \Theta^* + \Theta^k, \quad Q_r = Q_r^* + Q_r^k,$$

где T_1 и T_2 – нормальные усилия, направленные вдоль координатных линий $\varphi = \text{const}$ и $\Theta = \text{const}$; M_1 и M_2 – изгибающие моменты; Θ – угол поворота касательной к меридиану; Q_r – радиальное (перерезывающее) усилие. Здесь значками (*) обозначены величины в основном напряженном состоянии, а верхними индексами (^k) – в случае краевого эффекта; зависимость от координаты Θ опущена [2].

Представленное описание позволяет детально, по точкам, исследовать напряженное состояние поверхности, но для большинства практических задач достаточно иметь оценку интегрального влияния соединяемого слоя. В таком случае совокупность элементов a , b , c (рис. 1) удобно выделить в неоднородную анизотропную подсистему «соединяющий слой» (СС), оценка качества которой и составляет предмет исследования.

Одноосное приближение напряженного состояния вблизи слоя клея

В первом приближении можно считать, что СС представляет собой одноосный непоглощающий кристалл. Главные показатели преломления обыкновенного и необыкновенного (экстраординарного) лучей в этом так называемом кристалле обозначим N_o и N_e соответственно. Такое приближение допустимо ввиду доминирования сил взаимодействия между СС и материалами подложек [3].

Для определения напряженного состояния деталей в непосредственной близости от СС достаточно измерить наведенное двулучепреломление и ориентацию оптической оси. Это обусловлено тем, что в исследуемых областях возникает преимущественно одноосное напряженное состояние. Просветное зондирование этих областей с обеих сторон от СС позволяет исследовать явления, вызванные интегральным эффектом фотоупругости, и оценить качество соединений.

Азимуты поляризатора, анализатора и быстрой оси компенсатора относительно вертикальной оси (плоскости падения светового пучка) обозначим через P , A и Q соответственно. В случае наблюдения минимума интенсивности на выходе прибора (нулевое положение поляризационных элементов) основное соотношение имеет вид

$$-\text{tg} A_0 = \rho_s \frac{\rho_c + \text{tg} C_0 \cdot \text{tg} P_0}{\rho_c \cdot \text{tg} C_0 - \text{tg} P_0} \quad (1)$$

Величины A_0 , C_0 и P_0 определяются как

$$A_0 = A - q, \quad C_0 = Q - q, \quad P_0 = Q - P,$$

где q – азимут оптической оси образца относительно плоскости падения светового пучка (направление действия ненулевого напряжения). Величины ρ_s и ρ_c являются эллипсометрическими отношениями амплитудных коэффициентов пропускания образца и компенсатора,

$$\rho_s = \frac{T_s^{(p)}}{T_s^{(s)}} = \left| \frac{T_s^{(p)}}{T_s^{(s)}} \right| \cdot \exp(i\delta_s), \quad \rho_c = \frac{T_c^{(p)}}{T_c^{(s)}} = \left| \frac{T_c^{(p)}}{T_c^{(s)}} \right| \cdot \exp(i\delta_c),$$

где $T^{(p)}$ и $T^{(s)}$ – амплитудные коэффициенты пропускания для p - и s -компоненты соответственно.

Для просветной эллипсометрии при нормальном падении светового пучка и малой величине двулучепреломления для образца и компенсатора можно считать, что

$$\left| \frac{T_s^{(p)}}{T_s^{(s)}} \right| \cong 1, \quad \left| \frac{T_c^{(p)}}{T_c^{(s)}} \right| \cong 1.$$

Тогда соотношение (1) будет иметь вид

$$-\text{tg} A_0 = \exp(i\delta_s) \frac{\exp(i\delta_c) + \text{tg} C_0 \cdot \text{tg} P_0}{\exp(i\delta_c) \cdot \text{tg} C_0 - \text{tg} P_0} \quad (2)$$

или, при комплексной форме записи,

$$\text{tg} A_0 \cdot \exp(i\pi) = B \cdot \exp(i\delta_s) \cdot \exp(i\delta_B), \quad (3)$$

где

$$B = \left| \frac{\exp(i\delta_c) + \text{tg} C_0 \cdot \text{tg} P_0}{\exp(i\delta_c) \cdot \text{tg} C_0 - \text{tg} P_0} \right|, \quad \delta_B = \arg \left(\frac{\exp(i\delta_c) + \text{tg} C_0 \cdot \text{tg} P_0}{\exp(i\delta_c) \cdot \text{tg} C_0 - \text{tg} P_0} \right).$$

При фазовом сдвиге компенсатора $\delta_s \cong \pi/2$ можно получить выражение

$$B = \sqrt{\frac{1 + \text{tg}^2 C_0 \cdot \text{tg}^2 P_0}{\text{tg}^2 C_0 + \text{tg}^2 P_0}} = \sqrt{\frac{1 + \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0}{1 - \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0}}.$$

Таким образом, величина $B^2 = \text{tg}^2 A_0$ является $W(x)$ -преобразованием вида

$$W(x) = \frac{1+x}{1-x},$$

где $x = \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0$.

Воспользуемся обратным W^{-1} -преобразованием:

$$W^{-1}(W(x)) = W^{-1}(\operatorname{tg}^2 A_0) = \frac{\operatorname{tg}^2 A_0 - 1}{\operatorname{tg}^2 A_0 + 1} = \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0 = x,$$

на основе которого получим выражение

$$-\cos 2A_0 = -(\cos 2A \cdot \cos 2q + \sin 2A \cdot \sin 2q) = \cos 2P_0 \cdot \cos 2C_0 = x.$$

В случае $Q = \pm \pi/4$ величина x равна $\sin 2P \cdot \sin 2q$, отсюда следует

$$\operatorname{tg} 2q = -\frac{\cos 2A}{\sin 2A + \sin 2P}$$

или

$$q = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(-\frac{\cos 2A}{\sin 2A + \sin 2P} \right). \quad (4)$$

При решении уравнения (2) относительно основных эллипсометрических параметров следует учитывать условие равенства нулю его мнимой части [2]. Рассмотрение мнимой части уравнения (3) $\pi - \delta_s - \delta_B = 0$ показывает, что

$$\delta_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} C_0 \operatorname{tg} P_0} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} C_0}{\operatorname{tg} P_0} \right) = \pi + \operatorname{arctg} \left(\frac{1 + \operatorname{tg}^2 C_0}{\operatorname{tg}^2 P_0 - 1} \right) \cdot \operatorname{tg} P_0 = \pi + \operatorname{arctg} \frac{-\operatorname{tg} 2P_0}{\sin 2C_0}.$$

В случае $Q = \pm \pi/4$ это выражение преобразуется к виду

$$\delta_B = \pi + \operatorname{arctg} \frac{\mp 1}{\operatorname{tg} 2P \cdot \cos 2q},$$

откуда

$$\delta_s = \operatorname{arctg} \frac{\pm 1}{\operatorname{tg} 2P \cdot \cos 2q}. \quad (5)$$

На основании выражения (4) и соотношений

$$\cos 2q = \sqrt{1 - \sin^2 2q}, \quad \sin^2(\operatorname{arctg} x) = \frac{x^2}{1 + x^2}, \quad x = \frac{-\cos 2A}{\sin 2A + \sin 2P},$$

$$\cos 2q = \frac{1}{\sqrt{1 + x^2}} = \frac{\sin 2A + \sin 2P}{\sqrt{1 + \sin^2 2P + 2 \sin 2A \sin 2P}}$$

можно получить:

$$\delta_s = \operatorname{arctg} \left(\pm \frac{\sqrt{1 + \sin^2 2P + 2 \sin 2A \sin 2P}}{(\sin 2A + \sin 2P) \cdot \operatorname{tg} 2P} \right) = \operatorname{arctg} \left(\pm \frac{\sqrt{(1 - \sin^2 2A) + (\sin 2A + \sin 2P)^2}}{(\sin 2A + \sin 2P) \cdot \operatorname{tg} 2P} \right). \quad (6)$$

Таким образом, выражения (4), (5) или (6) позволяют определить по азимутам поляризатора, анализатора и большой оси компенсатора ($Q = \pm \pi/4$) в положении гашения ориентацию оптической оси и относительную разность фаз, возникающую в результате интегрального эффекта фотоупругости. Следует указать, что данные соотношения являются исключительно математическим отображением реально существующих зависимостей.

Наведенное двулучепреломление определяется зависимостью

$$\Delta n = N_o - N_e = \frac{\delta_s}{k_0 \cdot L} = \frac{\delta_s \cdot \lambda}{2\pi \cdot L},$$

где L – длина пути светового пучка в образце, равная для плоскопараллельной пластинки при нормальном падении света ее толщине; λ – длина волны монохроматического излучения. Если полученное значение положительно, то имеем случай одноосного сжатия, если отрицательно – растяжения.

Длина пути светового пучка в образце значительна, поэтому точность определения удельного двулучепреломления ($\Delta n / L$) имеет порядок 10^{-5} – 10^{-6} . На точность определения наведенного двулучепреломления также оказывает влияние близость краев соединений, что особенно существенно для соединений по узкой стороне. При малой величине наведенного двулучепреломления Δn добавка в фазовый сдвиг δ_s , учитывающая многократные отражения в оптических измерениях, является настолько малой величиной, что ей можно пренебречь.

Неулевое по абсолютному значению напряжение в плоскости, перпендикулярной направлению просвечивания, вычисляется по закону Вертгейма:

$$\sigma = -\frac{\delta_s \cdot \lambda}{2\pi L C_\sigma} = \frac{-\Delta n}{C_\sigma}.$$

Это выражение является физически верным, поскольку дает отрицательное значение при сжатии и положительное – при растяжении. Если рассматривать напряженное состояние в более общем случае, то σ является «добавочным напряжением» к всестороннему растяжению или сжатию.

Заключение

Анализ поляризационно-оптических свойств оптических соединений показывает, что предлагаемая методика позволяет определить не только толщины и показатели преломления зоны оптического контакта, но и сильно градиентной области соединяемых поверхностей элементов, прилегающей к зоне непосредственного оптического контакта поверхностей деталей 1 и 2 (рис. 3), выполненных из стекла марки К8.

Таким образом, для введенных оптических характеристик зоны контакта поверхности элементов оптического соединения представляется целесообразным использовать неразрушающий метод отражательной обобщенной эллипсометрии, отличающийся локальностью и высокой точностью. Этот метод позволяет установить влияние наведенного двулучепреломления на оптические характеристики клеевой сборки в целом. На рис. 3 представлен пример исследования зависимости изменения показателя преломления (СС толщиной $d_{ок}^* = 130$ нм; $n_{ок}^* = 1,4024$), соединяющей детали 1 и 2. Поляризационные параметры Δ и Ψ измерены на эллипсометре компенсационного типа ЛЭФ-3М, работающем по схеме PCSA. При длине волны источника излучения $\lambda = 0,6328$ мкм погрешность измерения азимутов поляризующих элементов составляет $S_{p,d} = 1'$, а установка угла падения светового пучка $S_o = 0,5'$.

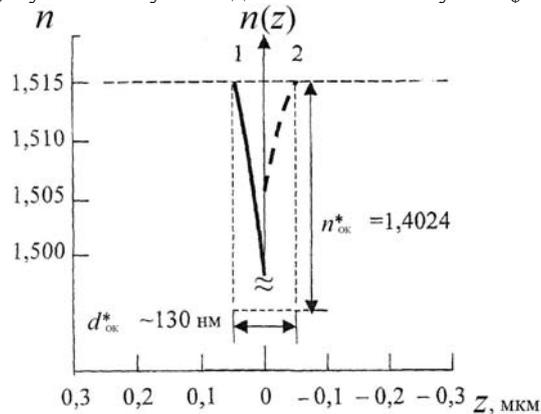


Рис. 3. Изменение показателя преломления $n(z)$ в оптическом контакте деталей 1 и 2, выполненных из стекла К8 ($n = 1,51466$)

Литература

1. Моссаковский В.И., Гудрамович В.С., Макеев Е.М. Контактные взаимодействия элементов оболочечных конструкций. Институт технической механики АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1988. – 288 с.
2. Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. Линейная теория тонких оболочек. – Л.: Политехника, 1991. – 656 с.
3. Демидов И.В., Лисицын Ю.В., Храмовский И.А., Шеломова О.А. Особенности применения метод-Фурье спектроскопии в технологическом контроле клеевых соединений оптических элементов автоклавируемых трубок // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). – 2002. – № 5. – С. 148–152.

Александров Максим Евгеньевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, max.alx@gmail.com

Нагибин Юрий Тихонович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, nagibin77@mail.ru

Трофимов Владимир Анатольевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, troftu@mail.ru

Шванова Мария Леонидовна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, shvanova_m@mail.ru

УДК 535.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ МЕТОДАМИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ И ИМПУЛЬСНОЙ ФОТОМЕТРИИ

М.Е. Александров, Т.М. Данилова, П.С. Беломутская, И.А. Храмцовский

Рассмотрен эллипсометрический метод аттестации образцовых элементов для спектрофотометрической аппаратуры. Проведено сопоставление результатов аттестации образцовых элементов методами эллипсометрии и импульсной фотометрии. Определены особенности временных изменений фотометрических характеристик образцовых элементов в петролейном эфире и в атмосфере воздуха при нормальных условиях.

Ключевые слова: эллипсометрия, импульсная фотометрия, потери излучения.

Введение

При наличии на оптической детали поверхностного слоя (ПС) со свойствами, отличными от свойств объема материала, реальные фотометрические характеристики не только не совпадают с расчетными значениями, полученными на основе формул Френеля, но и могут изменяться в процессе хранения и эксплуатации элементов [1–3]. Возросшие требования к аттестации оптических характеристик образцовых элементов с малыми потерями излучения в видимой области спектра заставляют учитывать эти обстоятельства. В качестве метода определения оптических характеристик ПС предложено использовать метод эллипсометрии неоднородных отражающих систем [1–3]. По оптическим характеристикам ПС можно определить потери оптического излучения, связанные с отражением поляризованного света от поверхностного слоя. Это позволяет уточнить истинные оптические характеристики образцовых элементов измерения для спектрофотометрической аппаратуры.

Целью работы является сопоставление расчетных значений коэффициента пропускания, полученных по данным эллипсометрических измерений, с данными экспериментальных измерений коэффициента пропускания по методу импульсной фотометрии T_{Φ} . Проведено исследование изменений коэффициента пропускания δT образцовых элементов, изготовленных из многокомпонентных силикатных стекол различного химического состава, хранившихся в петролейном эфире и в атмосфере воздуха при нормальных условиях.

Методика определения коэффициента пропускания элементов методом эллипсометрии

Для случая нормального падения светового пучка на элемент, изготовленный из изотропного оптического материала в виде плоскопараллельной пластинки и имеющий на поверхности неоднородный изотропный слой, следует использовать формулы для расчета коэффициента пропускания. С учетом многократных отражений светового пучка в пластинке и оптических характеристик поверхностного слоя значение T_{Σ} , определяемое методом эллипсометрии, примет вид [1, 3]:

$$T_{\Sigma} = T_0 - \alpha_p, \quad T_0 = 2 \cdot n_0 \cdot n_B \cdot (n_0^2 + n_B^2)^{-1}, \quad (1)$$

$$\alpha_p = T_0 \cdot k_0 \frac{n_0^2 - n_B^2}{n_0^2 + n_B^2} \times \left\{ \int_0^{\infty} [\delta n_1(z) + \delta n_2(z)] \cdot \sin(2n_0 k_0 z) dz \right\}. \quad (2)$$

Здесь T_0 – коэффициент пропускания элемента без учета оптических характеристик ПС; n_0 – показатель преломления стекла; n_B – показатель преломления внешней среды; α_p – потери оптического излучения в ПС;

$$k_0 = 2\pi/\lambda,$$

где λ – длина волны излучения; $\delta n_1(z)$ и $\delta n_2(z)$ – отклонение показателя преломления ПС от объемного значения n_0 на двух поверхностях элемента.

В качестве объектов исследования были выбраны пластинки стекол КИ, ЛКЗ, К8, ТФ12 размером $40 \times 40 \times 1 \text{ мм}^3$, поверхности которых полировались по стандартной технологии. Сравним результаты расчета и экспериментальных данных при определении коэффициента пропускания образцовых оптических элементов по данным методов эллипсометрии T_{Σ} и импульсной фотометрии T_{Φ} .

Оптические характеристики ПС определялись методом эллипсометрии по данным измерения поляризационных углов Δ и Ψ на приборе ЛЭФ-2 ($\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$) при углах падения светового пучка 50° , 55° , 60° и 70° . По формулам (1), (2) определялся коэффициент пропускания T_{Σ} . Коэффициенты пропускания образцов T_{Φ} измерялись при нормальном падении светового пучка методом импульсной фотометрии на установке, описанной в [2], при длине волны лазерного излучения $\lambda = 0,532 \text{ мкм}$ с погрешностью 0,01–0,02%. Значения показателей преломления в объеме материала n_0 были получены методом рефрактометрии. Коэффициент пропускания T_0 рассчитывался по формуле (1).

Учет влияния ПС при расчете коэффициентов пропускания T_{Σ} позволяет уменьшить ошибку в определении коэффициента пропускания T_0 . Разность значений T_{Σ} и T_{Φ} будет определяться близостью модельного профиля ПС к реальному, а также способом учета отличий дисперсионных свойств ПС от

свойств объема материала, показателя ослабления излучения μ в стекле и рассеянием излучения на шероховатой поверхности.

Под оптическим профилем поверхностного слоя понимается распределение локального показателя преломления по его глубине [1-3]. В нашем случае использовались модели однородного профиля (I) и экспоненциальное распределение показателя преломления по глубине поверхностного слоя (II).

| Марка стекла | Профили ПС на двух сторонах пластины | Параметры ПС ($\lambda=0,633$ мкм) | | Длина волны излучения λ , мкм | n_0 | Коэффициент пропускания элемента, % | | |
|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------|---------------------------------------|--------|-------------------------------------|------------|------------|
| | | n^* | d^* , мкм | | | T_0^{**} | T_3^{**} | T_Φ^* |
| КИ | II | 1,459 | 0,100 | 0,532 | 1,4607 | 93,23 | 93,17 | 93,09 |
| | I | 1,459 | 0,053 | 0,633 | 1,4570 | 93,31 | 93,26 | – |
| | | | | 1,064 | 1,4497 | 93,48 | 93,45 | 93,40 |
| КЗ | II | 1,489 | 0,127 | 0,532 | 1,4892 | 92,56 | 92,41 | 92,16 |
| | II | 1,489 | 0,234 | 0,633 | 1,4853 | 92,65 | 92,51 | – |
| | | | | 1,064 | 1,4779 | 92,83 | 92,70 | 92,68 |

Таблица 1. Оптические параметры ПС и коэффициентов пропускания, полученные различными оптическими методами, на элементах лазерной техники: (*) – экспериментальные и (**) – расчетные значения $T, \%$: I – модель однородного ПС, II – модель экспоненциального профиля ПС, n^* – эффективный показатель преломления ПС, d^* – эффективная толщина ПС [1, 3]

Исследование временных изменений коэффициента пропускания образцовых элементов

Испытания двух групп образцов проводились в течение двух лет. Первая группа образцов хранилась в атмосфере воздуха при нормальных условиях, вторая группа образцов хранилась в петролейном эфире. В табл. 2 приведены данные об изменении коэффициентов пропускания T_Φ элементов с течением времени при хранении двух идентичных партий образцов, выполненных из различных по структуре силикатных стекол. Условия хранения приведены выше. Изменение коэффициентов пропускания определялось как $\delta T_\Phi = T_H - T_K$, где T_H – начальное значение коэффициента пропускания, T_K – конечное значение коэффициента пропускания.

Для первой партии изменение можно объяснить изменением структуры ПС в результате физико-химического воздействия окружающей среды (атмосферы воздуха). Для второй партии образцов отмечено более значительное изменение δT_Φ . Такое изменение коэффициента пропускания δT_Φ для второй партии оптических элементов можно объяснить перестройкой структуры ПС вследствие уменьшения несоответствия внутренней энергии структуры системы «ПС–объем материала стекла» без воздействия внешней окружающей среды.

| Марка стекла | Изменение коэффициента пропускания, $\delta T_\Phi, \%$ | | | | | |
|--------------|---|---------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | В течение первого года | | В течение второго года | | Суммарные изменения | |
| | Первая партия | Вторая партия | Первая партия | Вторая партия | Первая партия | Вторая партия |
| К8 | 0 | + 0,10 | + 0,10 | + 0,10 | + 0,10 | + 0,20 |
| ЛКЗ | – 0,03 | – 0,03 | + 0,15 | + 0,20 | + 0,12 | + 0,17 |
| КИ | + 0,03 | + 0,16 | – 0,01 | + 0,02 | + 0,02 | + 0,18 |
| ТФ12 | + 0,12 | + 0,21 | + 0,05 | – 0,06 | + 0,17 | + 0,15 |

Таблица 2. Изменение коэффициента пропускания δT_Φ образцов с течением времени их хранения. Длина волны излучения $\lambda=0,532$ мкм

В ходе исследований было подтверждено влияние условий внешней среды на оптические характеристики поверхностного слоя, а также показана справедливость термодинамических уравнений для определения коэффициента пропускания плоскопараллельной пластинки небольших размеров.

Заключение

Таким образом, для метрологической аттестации образцовых средств измерений спектрофотометрических характеристик следует использовать метод эллипсометрии, позволяющий определять оптические характеристики ПС и расчетным путем с достаточной точностью оценивать потери оптического излучения при отражении светового пучка. Для объективной оценки достоверности полученных резуль-

татов следует также проводить сопоставительный анализ с данными оптических измерений коэффициента пропускания методом импульсной фотометрии.

Показано, что замена общепринятого способа хранения образцовых элементов в петролейном эфире на хранение в контролируемой воздушной среде при нормальных условиях позволяет уменьшить временные изменения коэффициента пропускания.

Литература

1. Иванов В.Ю., Данилова Т.М, Храмцовский И.А К дискуссии о критерии качества внутрирезонаторных элементов ионных и эксимерных лазеров // Наука и техника: Вопросы истории и теории. Выпуск XXV. – СПб: СПб ИИЕТ РАН, 2009 – С. 315.
2. Каданер Г.И., Кислов А.В., Кувалдин Э.В. Импульсная фотометрическая установка для измерения коэффициентов пропускания материалов // Импульсная фотометрия. – Л., 1981. – Вып. 7 – С. 1048–1051.
3. Храмцовский И. А., Пшеницын В. И., Каданер Г.И., Кислов А.В. Учет оптических характеристик поверхностного слоя при определении коэффициентов отражения и пропускания прозрачных диэлектриков // ЖПС. – 1987. – Т. 46. – № 2. – С. 272–279.

- Александров Максим Евгеньевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, itrao@mail.ru
- Данилова Татьяна Михайловна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, Tadia@yandex.ru
- Беломутская Полина Сергеевна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, itrao@mail.ru
- Храмцовский Игорь Анатольевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, вед. инженер, Tadia@yandex.ru

УДК 004.932

ФОРМИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ 3D-ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРООБЪЕКТОВ ПО СЕРИИ ВИДЕОКАДРОВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

А.Н. Аверкин, А.С. Потапов, А.С. Рожков

Предложен метод построения карты глубины сцены по набору слоев – изображений микрообъектов, полученных с изменяемым положением плоскости фокусировки. В основе метода лежит оценка локального значения дисперсии модуля градиентного поля, анализ распределения которой по слоям позволяет определить расстояния до соответствующих точек сцены и отделить наблюдаемый объект от фона. Реализована система визуализации восстанавливаемой карты глубины с наложением на нее в качестве текстуры синтезированного изображения высокой четкости.

Ключевые слова: форма из фокусировки, изображения микрообъектов, локальная дисперсия.

Введение

В настоящее время в микроскопии все чаще ставится задача анализа трехмерной формы наблюдаемых объектов. Обычно в этих целях применяются стереоскопические системы, использующие способность зрительной системы человека восстанавливать трехмерную форму по стереоизображениям. Возможно использование автоматических методов анализа стереоснимков [1], но результаты работы этих методов на сегодняшний день являются недостаточно надежными. Существуют также методы 3D-реконструкции на основе конфокальной лазерной сканирующей микроскопии [2], однако необходимое при этом оборудование заметно дороже и чувствительнее к условиям функционирования.

В этой связи интерес представляет метод «форма из фокусировки». Общая идея этого метода, заключающаяся в возможности определения дальности до сцены по тому, при каком расстоянии фокусировки изображение оказывается наиболее «резким» (энергетический пространственный спектр изображения максимально смещен в сторону высоких частот), давно известна [3]. Однако в связи с тем, что данный метод требует получения многих кадров и не может применяться для динамических сцен, он оказался не слишком популярным. Как правило, в литературе приводится общая идея решения проблемы «форма из фокусировки», тогда как на практике возникает множество дополнительных трудностей. В связи с этим разработка эффективных методов решения данной задачи по-прежнему остается актуальной, в особенности в микроскопии [4].

В работе [5] отмечается, что большинство существующих реализаций метода «форма из фокусировки» для изображений микрообъектов основано на моделировании функции рассеяния точки для конкретной оптической системы, что требует детальной информации о системе и большого объема вычислений. В работе [6] проблема «формы из фокусировки» рассматривается в рамках байесовского подхода с использованием марковских случайных полей. Однако авторам для получения метода, допускающего практическое применение, приходится вводить сильные упрощения в модель, в частности, предположение о статистической независимости расстояний до разных точек сцены за исключением точек, соответствующих смежным пикселям. Анализ научно-технической литературы показывает, что необходима разработка методов, не опирающихся на строгие, но зачастую неприменимые физические и математические модели.

В настоящей работе рассмотрено решение указанной задачи применительно к модели микроскопа МЕТАМ РВ-21-2 с учетом необходимости определения областей сцены, находящихся вне диапазона фокусных расстояний, а также неинформативных областей, для которых дальность не может быть определена из-за дефектов изображения. Приводится описание метода визуализации восстанавливаемого объемного изображения.

Быстрый алгоритм «форма из фокусировки»

Пусть дан набор из N изображений некоторой сцены, полученных из одной и той же точки пространства, причем объекты сцены также остаются неподвижными. Эти двумерные изображения $I_w(x, y)$, трактуемые далее как слои составного изображения, отличаются друг от друга глубиной фокусировки, которая изменялась от кадра к кадру на некоторую величину (здесь $w = 0, \dots, N$ – номер слоя; x и y – координаты пикселей на изображениях). Задача заключается в установлении для каждого пикселя номера слоя, наиболее точно отвечающего дальности до соответствующей точки сцены.

Для решения этой задачи был разработан следующий алгоритм. На первом шаге работы алгоритма к каждому из слоев составного изображения применяется оператор Собеля с маской размером 3×3 элемента,

$$G_y(x, y) = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I_w(x, y), \quad G_x(x, y) = \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * I_w(x, y),$$

где * – операция свертки. В результате формируется новое многослойное изображение

$$G_w(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)}.$$

На следующем шаге алгоритма рассчитывается локальное значение дисперсии модуля градиента в каждом пикселе каждого слоя изображения:

$$D_w(x, y) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=x-k}^{x+k} \sum_{j=y-k}^{y+k} [G_w(i, j) - G_{ws}(x, y)]^2, \quad (1)$$

где $D(x, y)$ – значение дисперсии в окне вокруг пикселя с координатами x, y для изображения G_w , полученного в результате свертки с оператором Собеля; n^2 – площадь области (окна), в которой вычисляется дисперсия для центрального ее элемента; $k = (n-1)/2$ – половина размера окна без центрального элемента; G_{ws} – среднее значение элементов изображения G_w , попавших под маску размером $n \times n$, для текущего пикселя.

Непосредственное применение уравнения (1) потребовало бы сделать два прохода по всем слоям изображения: один проход – для вычисления среднего значения, а затем второй проход – для вычисления собственно дисперсии. В результате несложных математических преобразований формулу для расчета дисперсии можно представить в следующем виде:

$$D_w(x, y) = \left(\frac{1}{n^2} \sum_{i=x-k}^{x+k} \sum_{j=y-k}^{y+k} G_w^2(i, j) \right) - \left(\frac{1}{n^2} \sum_{i=x-k}^{x+k} \sum_{j=y-k}^{y+k} G_w(i, j) \right)^2. \quad (2)$$

Используя формулу (2), можно за один проход просуммировать как значения $G_w(i, j)$, так и их квадраты. Дисперсия равна разнице между средним арифметическим квадратов и квадратом среднего арифметического. Однако при этом для каждого пикселя изображения потребуется выполнять n^2 операций, что затруднительно сделать (без привлечения параллельных вычислений) в масштабе реального времени.

В предлагаемом в настоящей работе методе для вычисления среднего по окну используется быстрый алгоритм, суть которого заключается в следующем. Сначала усреднение производится горизонтальной одномерной маской размером $1 \times n$, а после этого получившееся изображение усредняется вертикальной одномерной маской размером $n \times 1$. На каждом шаге при перемещении маски на один элемент не происходит суммирование по всем элементам заново, а используется информация, сохраненная на предыдущем шаге. Значения под маской подвергаются лишь незначительным изменениям: добавляется только один новый элемент и, соответственно, только один элемент удаляется. В связи с этим время расчета дисперсии не зависит от размера маски.

После того как для каждого слоя рассчитаны значения локальной дисперсии, выполняется следующий шаг алгоритма – построение изображения высокой четкости. При этом происходит компенсация основного ограничения оптической микроскопии – малой глубины резкости.

Построение изображения высокой четкости осуществляется следующим образом. Для каждого пикселя анализируются значения локальной дисперсии в каждом слое. Определяются максимальное и минимальное значения дисперсии. В результирующее изображение высокой четкости помещается яркость пикселя из слоя, в котором для данного пикселя значение дисперсии максимально. Номер выбранного слоя для каждого пикселя указывает также наиболее вероятное расстояние до соответствующей точки сцены. Однако для построения карты глубины требуется исключить также точки, принадлежащие фону и дефектам изображения, чтобы отделить их от области объекта.

Фон, находящийся вне диапазона глубин фокусировки, и дефекты изображения оказывают негативное влияние на процесс визуализации реконструированного 3D-объекта. В работе [5] для устранения фона используется операция бинаризации поля дисперсии яркостей по некоторому порогу, задаваемому вручную в предлагаемой авторами программной оболочке. После бинаризации изображения высокой четкости требуется выполнить операцию уничтожения всех обнаруженных областей, размер которых не превышает некоторого порога. Однако такой способ отделения фона накладывает определенные ограничения на форму исследуемых объектов.

Авторами предлагается новый критерий для выделения области объекта. Само значение локальной дисперсии не является надежной характеристикой, так как для фона ее значение будет малым (фон максимально «нерезкий»), а для дефектов изображения – большим (дефекты – царапины, пылинки – максимально «резкие»). Для точек объекта локальная дисперсия будет сильно варьироваться в зависимости от параметров текстуры. В то же время нормированная разница между максимальной и минимальной (по

слоям) дисперсиями будет малой как для точек фона, так и для дефектов. Порог на эту величину может быть автоматически установлен путем выделения двух мод на ее гистограмме, построенной по всем пикселям изображения.

Таким образом, строится изображение высокой четкости и карта глубины, на которой выделены области, принадлежащие наблюдаемому объекту.

Экспериментальная проверка алгоритма построения карты глубины

Рассмотрим набор из 18 снимков, полученных путем последовательного изменения расстояния фокусировки. На рис. 1 представлены три изображения из данного набора. Как видно из рисунка, входные изображения искажены различными дефектами объектива (царапинами, пылинками). Также присутствует фон, не попадающий в глубину резкости ни на одном снимке.

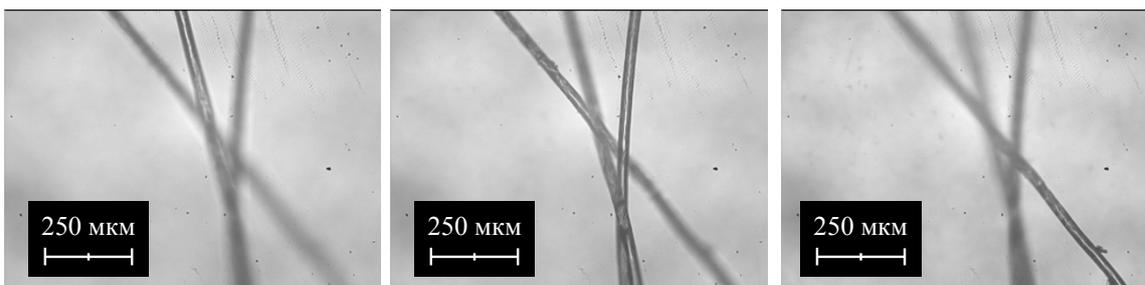


Рис. 1. Изображения поверхности, полученные при фокусировке на дальнюю (а), среднюю (б) и ближнюю (в) части объекта

На рис. 2 представлен результат синтеза изображения максимальной четкости по критерию максимума локальной дисперсии модуля градиента.

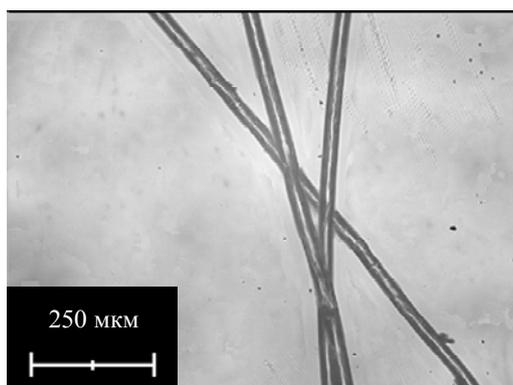


Рис. 2. Изображения микрообъекта высокой четкости

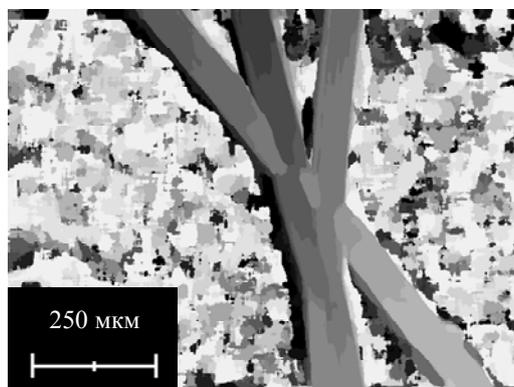


Рис. 3. Построение карты глубины без выделения объекта

Полученное изображение содержит не больше дефектов, чем исходные изображения, поэтому может сложиться впечатление, что данный критерий является достаточным. Однако вид карты глубины (рис. 3), также построенной по этому критерию (на карте глубины яркость каждого пикселя пропорцио-

нальна номеру выбранного в этом пикселе слоя), характеризуется большим уровнем шума в пикселях, соответствующих фону и дефектам изображения, и является непригодной для визуализации.

На рис. 4 представлена карта глубины после выполнения всех шагов разработанного алгоритма.

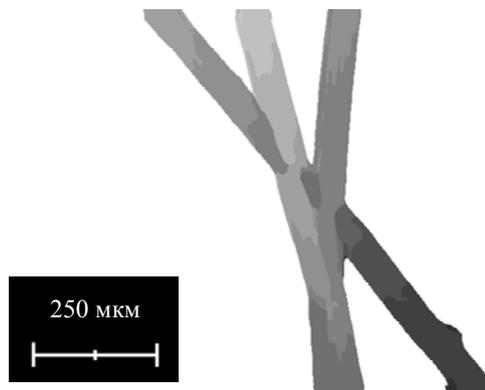


Рис. 4. Карта глубины наблюдаемого объекта

Из рис. 1 и 4 видно, что построенная карта глубины адекватно отражает распределение пикселей по слоям, сформированное при различных расстояниях фокусировки. Данное обстоятельство свидетельствует о практической пригодности предложенного метода для построения карт глубины различных наблюдаемых микрообъектов.

3D-визуализация

Большое значение имеет визуализация 3D-информации, в связи с чем методы восстановления трехмерной формы должны быть дополнены соответствующими средствами ее отображения. При выполнении настоящей работы был разработан программный модуль, позволяющий строить трехмерную модель микрообъекта по результатам работы (карте глубины и изображению высокой четкости) описанного выше алгоритма для дальнейшего анализа этой модели пользователем.

Здесь модель представляет собой сетку полигонов, сгруппированных по два в прямоугольники. В зависимости от выбранного пользователем значения уровня детализации n каждому n -му пикселю изображения сопоставляется вершина прямоугольника, которая, в свою очередь, является узлом полигональной сетки модели. Координаты x и y каждой вершины задаются шагом сетки, в то время как координата z рассчитывается на основе яркости соответствующего пикселя карты глубины, умноженной на коэффициент глубины, также задаваемый пользователем.

На сгенерированную модель в качестве текстуры накладывается изображение повышенной четкости, затем напротив нее помещается камера, направленная на центр модели. Однако этого недостаточно для удобного восприятия глубины и рельефа объекта пользователем. Поскольку изображение проецируется на плоскость экрана, при отсутствии движения зрительная система наблюдателя не в состоянии определить относительное расстояние до точек образца. Для компенсации этого ограничения была обеспечена возможность вращения модели и регулировки положения камеры, что также помогает пользователю более подробно изучить образец. Кроме того, модель затеняется при помощи одного стационарного источника освещения, что позволяет подчеркнуть рельеф образца.

В качестве примера была выбрана серия, состоящая из 24 изображений, три из которых представлены на рис. 5. На рис. 6 представлены примеры 3D-визуализации с одного ракурса без использования затенения и с его использованием.

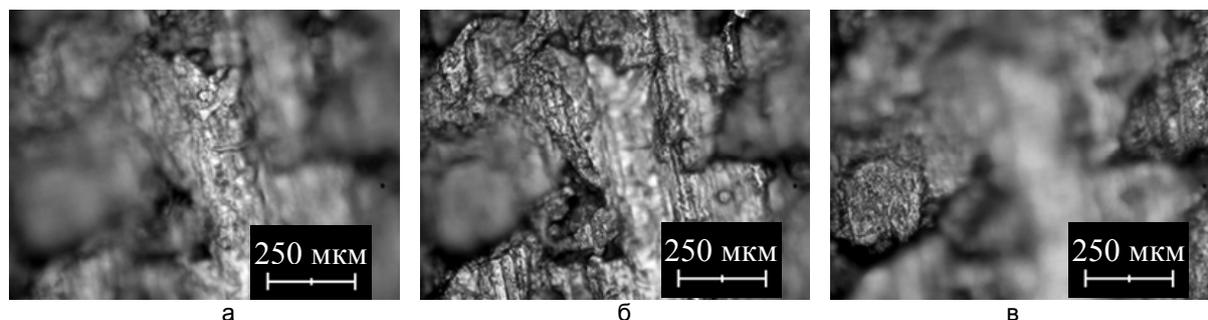


Рис. 5. Изображения поверхности, полученные при фокусировке на дальнюю (а), среднюю (б) и ближнюю (в) части объекта

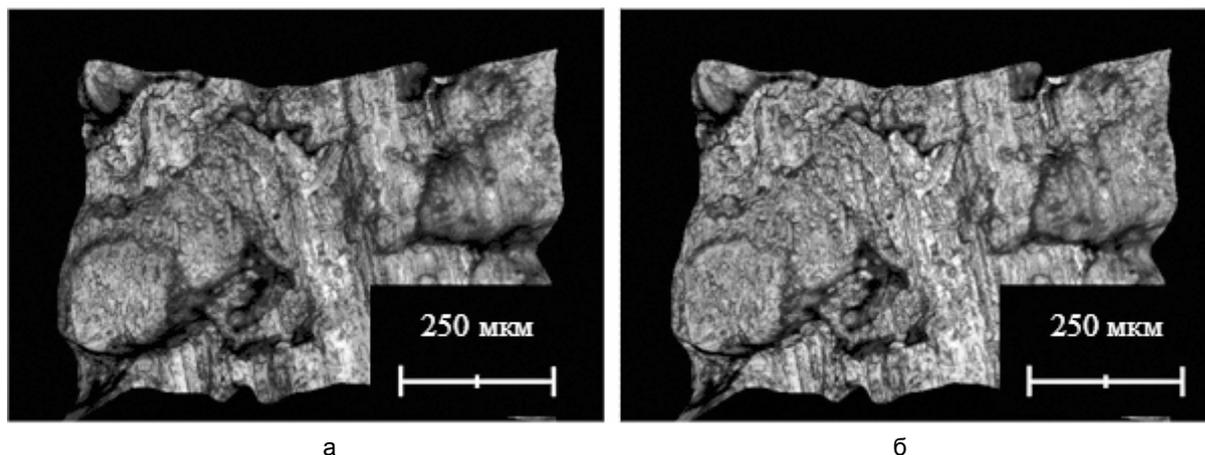


Рис. 6. Результат 3D-визуализации с затенением (а) и без затенения (б)

В качестве способа затенения было применено затенение по Гуро (Gourad shading). Оно было впервые предложено в работе [7] и наряду с затенением по Фонгу используется в трехмерной графике для расчета непрерывного затенения поверхностей, заданных сетками полигонов. Однако по сравнению с затенением по Фонгу, в котором нормали рассчитываются для каждой точки поверхности, затенение по Гуро проще в реализации и менее требовательно к вычислительным ресурсам, поскольку для него необходимы нормали только в вершинах полигонов. Основная идея данного метода визуализации заключается в расчете нормалей вершины путем усреднения нормалей всех примыкающих к ней полигонов. Затем для каждой нормали рассчитывается величина освещенности как скалярное произведение нормали и направления падения света. Для определения освещенности точек полигона найденные значения освещенности в вершинах линейно интерполируются.

На рис. 7 представлены примеры плоского затенения и затенения по Гуро. При плоском затенении нормали вершин каждого четырехугольника рассчитываются независимо. Так как все грани лежат в одной плоскости, нормали всех вершин коллинеарны, и соответственно четырехугольник освещен равномерно. В результате хорошо заметна сетка, использованная в модели; кроме того, резкие границы между смежными прямоугольниками мешают восприятию формы объекта. При затенении по Гуро результат визуально воспринимается лучше, и сама карта затенения может использоваться для оценки восстановленной трехмерной формы наблюдаемого объекта.

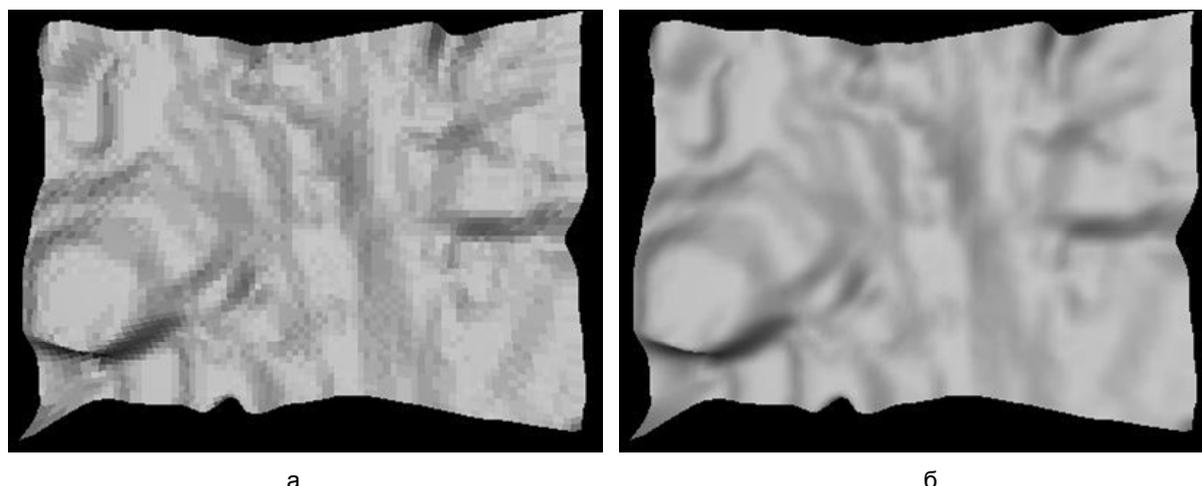


Рис. 7. Плоское затенение (а) и затенение по Гуро (б)

Заключение

Предложенный алгоритм восстановления формы объектов по серии видеок кадров, полученных при разных расстояниях фокусировки, опирается на анализ локальных значений дисперсии модуля градиента изображения в разных слоях. При этом номер слоя с максимальной дисперсией указывает на наиболее вероятную глубину соответствующей точки сцены.

Исключение из рассмотрения точек, принадлежащих фону (находящихся вне диапазона расстояний фокусировки), а также относящихся к дефектам изображения, осуществляется на основе величины относительной разности максимальной и минимальной дисперсий для данного пикселя. Порог на эту разность устанавливается путем анализа гистограммы ее распределения по всему изображению. Данный критерий отличает предложенный метод от ряда существующих методов, которые используют ручную подбираемый порог на значение дисперсии яркостей. Благодаря тому, что в методе проводится расчет только локальной дисперсии, для вычисления которой использован алгоритм, требующий нескольких операций на пиксель, оказывается возможным построение карты глубины в масштабе реального времени.

Экспериментальные исследования и использование созданного программного модуля подтвердили достаточно высокое качество визуализации реконструированного 3D-изображения, что свидетельствует о практической применимости разработанного метода. Тем не менее, в будущем необходимо исследовать возможность улучшения результатов реконструкции путем учета взаимосвязи между дальностью до соседних точек сцены, а также путем интерполяции значений дальности для повышения точности карты глубины.

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

Литература

1. Greenberg G.L., Boyde A. Direct View 3-D Microscopy Using Conventional Lenses // *European Microscopy and Analysis*. – 1997. – P. 5–7.
2. Packroff G., Lawrence J.R., Neu T.R. In Situ Confocal Laser Scanning Microscopy of Protozoans in Cultures and Complex Biofilm Communities // *Acta Protozool.* – 2002. – V. 41. – P. 245–253.
3. Pentland A.P. Depth of Scene from Depth of Field // *Proc. Image Understanding Workshop*. – 1982. – P. 253–259.
4. Schmitz D., Seibt D., Herpers R., Heiden W. 3D-Reconstruction of Microscopic Translucent Silicate-based Marine and Freshwater-Organisms // *Aktuelle Methoden der Laser- und Medizinphysik: Tagungsband der 2. Remagener Physiktage*. – 2004. – P. 43–48.
5. Niederöst M., Niederöst J., Šcucka J. Automatic 3D reconstruction and visualization of microscopic objects from a monoscopic multifocus image sequence // *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2003. – V. XXXIV. – 5/W10.
6. Gaganov V., Ignatenko A. Robust Shape from Focus via Markov Random Fields // *Proceedings of Graphicon Conference*. – 2009. – P. 74–80.
7. Gouraud H. Continuous shading of curved surfaces // *IEEE Transactions on Computers*. – 1971. – V. 20. – № 6. – P. 623–629.

- Аверкин Антон Нилович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ant-averkin@rambler.ru
- Потапов Алексей Сергеевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, pas.aicv@gmail.com
- Рожков Алексей Сергеевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, alexisrozhkov@gmail.com

УДК 004.932

МЕТОД ПОДСЧЕТА ЭРИТРОЦИТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ МАЗКОВ КРОВИ

А.В. Дырнаев

В рамках компьютерного анализа препаратов крови часто возникает задача подсчета эритроцитов на изображениях, полученных с помощью микроскопа. Изложен метод сегментации таких изображений, основанный на детектировании границ методом Канни, с последующим выявлением центров кривых, которые, в свою очередь, являются предполагаемыми центрами клеток. Метод устойчив к изменениям структуры, текстуры и цвета клеток, а также позволяет производить подсчет клеток, даже перекрывающихся друг с другом, в условиях помех на изображении.

Ключевые слова: подсчет количества клеток, цифровая микроскопия, сегментация изображений.

Введение

В задачах анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, в рамках цитологических исследований часто возникает необходимость подсчета количества клеток определенного типа. При исследовании препаратов крови важной задачей является подсчет количества эритроцитов, исходя из показателей которого можно диагностировать нарушения в кровообразовании или повреждения эритроцитов вследствие различных факторов.

Среди клеток крови различают эритроциты, лейкоциты, тромбоциты. Эритроцит – безъядерная клетка розового цвета, имеющая форму несколько уплощенного эллипсоида с вдавлением в центре при среднем размере 8 мкм. Лейкоциты различаются от эритроцитов по их большему размеру, составляющему 9–20 мкм, по наличию ядра и по характеру окраски, которая может быть фиолетовой, розовой или ярко-красной. Тромбоциты – безъядерные образования округлой или овальной формы размером 1–3 мкм, с красно-фиолетовым центром и розовато-голубой периферией.

Существуют различные методы подсчета эритроцитов в крови, некоторые из них используют уже смоделированную базу изображений клеток крови и их характеристик [1–4], некоторые – пороговое разложение [5] или сегментацию методом управляемого водораздела [6]. Существуют подходы, в которых для сегментации используются цветовые характеристики изображения [7, 8] или текстурные характеристики [8]. В [9] предложено использовать алгоритм активной контурной модели для выделения контуров клеток.

Основная проблема при подсчете клеток заключается в том, что они могут перекрываться друг с другом, а также изменять свою форму в некотором диапазоне. Наличие посторонних шумов, посторонних объектов в поле зрения микроскопа дополнительно усложняет анализ изображения.

В настоящей работе для снижения влияния шумов предлагается использовать медианную фильтрацию изображений [10] с последующим выделением контуров клеток детектором границ Канны [11]. Для улучшения распознавания границ изображение дополнительно контрастируется.

Метод выделения и подсчета эритроцитов

Для устранения влияния шумов предлагается использовать медианную фильтрацию с окном размером $m \times m$, где m зависит от оценки диаметра клетки, задаваемой вручную, либо рассчитываемой, исходя из масштаба изображения и предполагаемого размера искомых клеток.

Одномерный медианный фильтр представляет собой «скользящее окно» протяженностью N отсчетов, в котором центральный элемент заменяется медианой (т.е. средним элементом последовательности, упорядоченной в порядке возрастания значений сигнала в «окне»). Таким образом, операция медианной фильтрации K -мерной последовательности значений сигнала $s(k) = s(x_k)$, $k = 1, \dots, K$, характеризуется соотношением

$$\text{med}_{1 \leq k \leq N} \{s_k\} = \begin{cases} 0,5(s_n + s_{n+1}), & N = 2n, \\ s_n, & N = 2n - 1, \end{cases}$$

где фиксированное значение $n = 1, 2, \dots$ определяет апертуру фильтра.

Следующий этап состоит в выделении границ, после чего методом связанных компонент с критерием связности по восьми соседям выделяются отдельные контуры. Для каждой связанной области вычисляется площадь выпуклого многоугольника, описывающего контур. По заданным порогам отсекаются участки, имеющие слишком большую или слишком малую площадь. Пороги выбираются, исходя из предполагаемой реальной площади клетки.

Затем из каждого отдельного контура с равными интервалами по длине контура выбираются точки. Парно точки соединяются друг с другом, и через середину полученного отрезка проводится перпендикуляр. Его можно описать уравнением

$$y = -\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} x + \frac{y_2^2 - y_1^2 + x_2^2 - x_1^2}{2(y_2 - y_1)},$$

где (x_1, y_1) – координаты первой точки; (x_2, y_2) – координаты второй точки.

Расположение точки пересечения соседних перпендикуляров сохраняется. Точка пересечения двух перпендикуляров рассчитывается как

$$x = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2},$$

$$y = a_1 x + b_1 = a_2 x + b_2,$$

где $a = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}$ – коэффициент наклона перпендикуляра; $b = \frac{y_2^2 - y_1^2 + x_2^2 - x_1^2}{2(y_2 - y_1)}$ – коэффициент смещения перпендикуляра.

Операция продлевается для всех пар перпендикуляров для различных шагов взятия точек. В результате образуется облако точек, расположенных более плотно в областях, являющихся центрами радиуса кривых контура.

Клетки, слипшиеся друг с другом или наложенные одна на другую, достаточно сложно поддаются сегментации методами, основанными на анализе размеров или формы областей внутри контуров. Разрывы на контурах усложняют контурную сегментацию клеток. Предложенный метод составляет единое для

всех участков контуров изображение их центров, позволяя, таким образом, решить обозначенные выше проблемы.

Картина, составленная из полученных точек пересечения перпендикуляров, подвергается морфологической обработке, в результате которой остаются только плотные и достаточно крупные скопления точек. Эти скопления соответствуют предполагаемым центрам клеток. С помощью метода связанных компонент ведется подсчет скоплений, который должен соответствовать количеству клеток на изображении.

Результаты эксперимента

В ходе экспериментального исследования предложенного метода было взято изображение образца крови, полученное с помощью микроскопа (рис. 1).

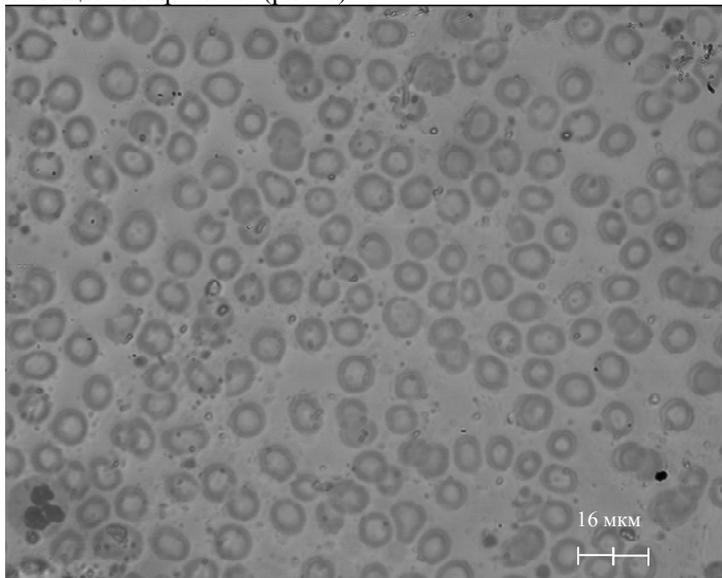


Рис. 1. Тестовое изображение

В первую очередь изображение было преобразовано из цветного в черно-белое. Размер окна при медианной фильтрации был выбран, исходя из среднего размера клеток, и составил 16×16 пикселей, что соответствует 20% от диаметра клетки. Результат медианной фильтрации тестового изображения представлен на рис. 2.

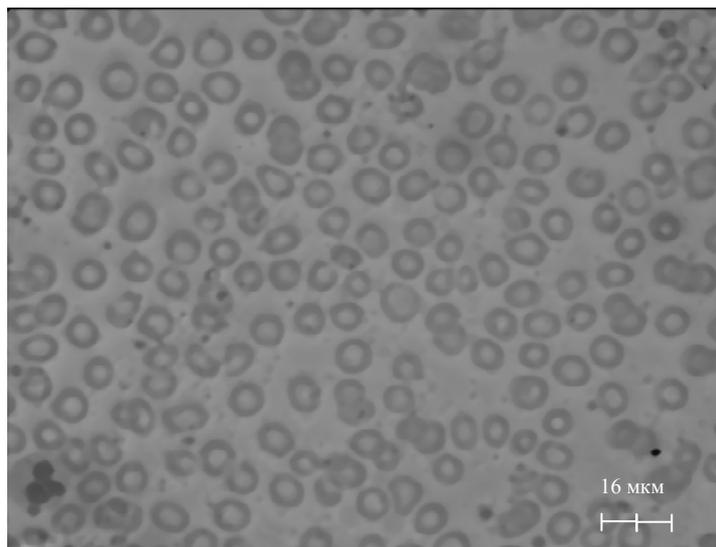


Рис. 2. Результат медианной фильтрации

После линейного контрастирования изображения был применен детектор границ Канны (рис. 3). В алгоритме Канны сначала производится сглаживание изображения для удаления шума. Затем границы выделяются там, где градиент изображения приобретает максимальное значение, при этом только локальные максимумы отмечаются как границы. Следующим этапом следует определение потенциальных границ двойной пороговой фильтрации. Итоговые границы определяются путем подавления всех краев, не связанных с определенными границами.

В качестве порогов для удаления слишком больших или слишком малых контуров на изображении были выбраны два значения: $0,05S$ в качестве нижнего порога и $4S$ в качестве верхнего порога, где S – приблизительная площадь изображения клетки, рассчитанная исходя из ее диаметра.

В результате построения перпендикуляров (рис. 4) для отрезков между точками, взятыми с интервалами 3–40 пикселей, для каждого контура было получено облако точек пересечения (рис. 5).

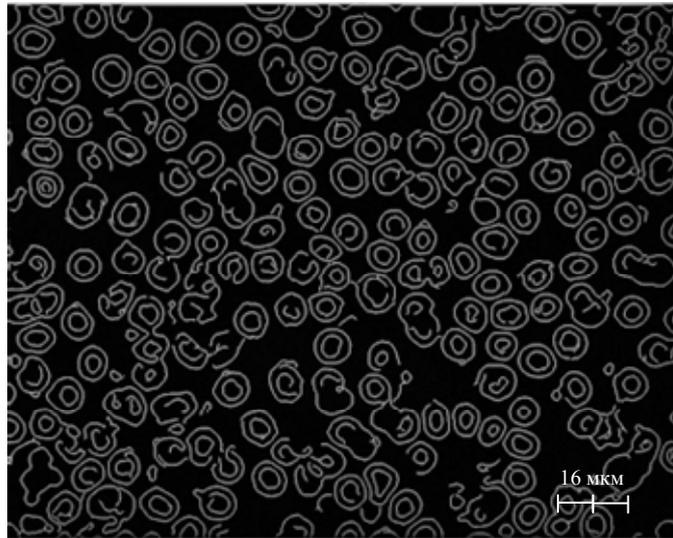


Рис. 3. Изображение краев, на котором удалены большие и малые контуры

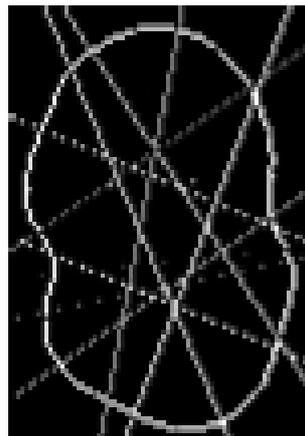


Рис. 4. Перпендикуляры; интервал между точками = 20

Количество связных компонент равнялось 220. Реальное количество клеток на изображении получено равным 209. Число ложных срабатываний составило 23, число нераспознанных клеток – 12. Метод был опробован на четырех различных изображениях, содержащих клетки крови. Средняя вероятность правильного подсчета количества клеток эритроцитов составила 86%. По сравнению с методами, использующими пороговое разложение [5] или сегментацию методом управляемого водораздела [6], предложенный метод дал лучшие результаты. Однако в сравнении с методами, предложенными в [1–4, 9], вероятность правильного подсчета количества клеток оказалась меньше, так как детектор границ некорректно выделил края на тестовых изображениях из-за сильной зашумленности и наличия нечетких границ. Для таких изображений необходимы дополнительные методы предварительной обработки для повышения эффективности выделения краев.

Из изображения облака точек были изъяты участки с площадью менее 5 пикселей, а затем была проведена операция закрытия бинарного изображения с маской 8×8 пикселей. Результат морфологической обработки изображения точек пересечения, наложенный на исходное изображение, представлен на рис. 6.

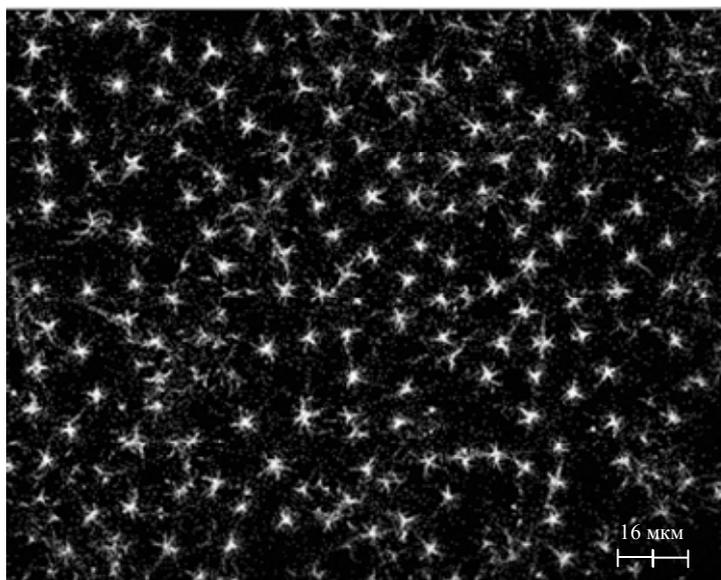


Рис. 5. Облака точек

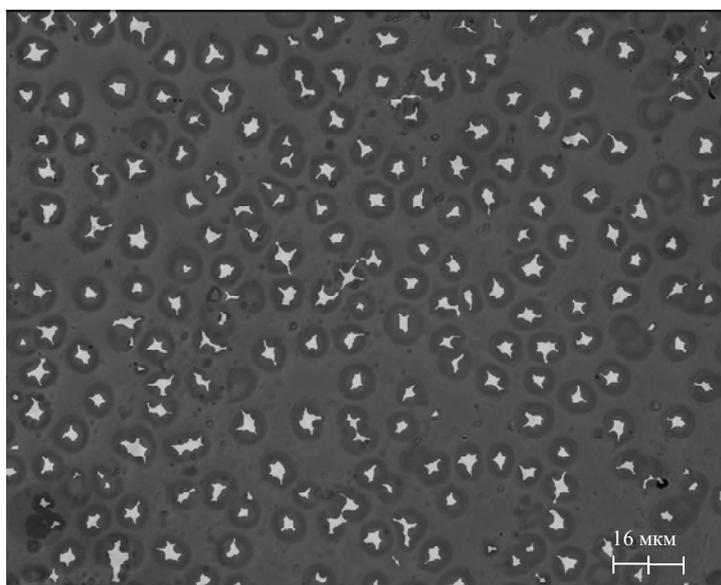


Рис. 6. Морфологически обработанное изображение точек пересечения, наложенное на исходное изображение

Заключение

Из-за того, что для определения клеток используется детектор границ, результаты сегментации не зависят от цвета клеток, их текстуры и внутренней структуры. Метод с достаточно высокой точностью сегментирует клетки, слипшиеся друг с другом или наложенные друг на друга. В условиях зашумленности исходного изображения метод показал хорошие результаты.

Предложенный алгоритм позволил осуществить сегментацию и подсчет клеток крови с точностью 86%. Количество ложных обнаружений клеток в среднем выше, чем у других методов, что можно объяснить наличием на тестовых изображениях большого количества шумов, а также нечеткими границами клеток. Более высокой вероятности правильного подсчета числа клеток можно достичь, если параллельно с предложенным методом использовать другие, уточняя результат сегментации одного метода результатами другого, а также применять другие алгоритмы предварительной обработки исходного изображения. В дальнейшем планируется разработка алгоритма предварительной обработки изображения для повышения эффективности предложенного метода, а также комбинация предложенного метода с другими.

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

Литература

1. Dahmen J., Hektor J., Perrey R., Ney H. Automatic Classification of Red Blood Cells Using Gaussian Mixture Densities // Proc. Bildverarbeitung für die Medizin. – 2000. – P. 331–335.
2. Costrarido L. Medical Image Analysis Methods: Evaluation Strategies for Medical-image Analysis. – Taylor & Francis, United States of America, 2005. – P. 433–471.
3. Kumar B.R., Joseph D.K., Teager T.V.S. Energy Based Blood Cell Segmentation // 14th International Conference on Digital Signal Processing. – DSP, 2002. – 1–3 July. – Santorini, Greece. – V. 2. – P. 619–622.
4. Bamford P. Empirical Comparison of Cell Segmentation Algorithms Using an Annotated Dataset // Proc. IEEE International Conference on Image Processing. – 2003. – V. 2. – P. 1073–1077.
5. Mukherjee D.P., Ray N., Acton S.T. Level Set Analysis for Leukocyte Detection and Tracking // IP. – 2004. – V. 13. – № 4. – P. 562–572.
6. Park J., Keller J.M. Snakes on the Watershed // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – PAMI, 2001. – V. 23. – № 10. – P. 1201–1205.
7. Sinha N., Ramakrishnan A.G. Blood Cell Segmentation Using EM Algorithm // Proc. Third Indian Conference on Computer Vision. Graphics Image Processing (ICVGIP), 2002. – Ahmadabad, India, 2002, December 16–18. – P. 376–382.
8. Kumar R.S., Verma A., Singh J. Color Image Segmentation and Multi-Level Thresholding by Maximization of Conditional Entropy // International Journal of Signal Processing. – 2006. – V. 3. – № 1. – P. 121–125.
9. Mcinerney T., Terzopoulos D. Deformable models in medical image analysis: A survey // Med Image Anal. – 1996. – P. 91–108.
10. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L. Introduction to Algorithms. – MIT Press, 1990. – P. 185–191.
11. Canny J.F. A computational approach to edge detection // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – P. 679–698.

Дырнаев Алексей Валерьевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, dirnalex@yandex.ru

УДК 535.4, 535-14

СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА НА ЩЕЛИ

М.С. Куля, Я.В. Грачев, А.А. Городецкий, В.Г. Беспалов

Экспериментально и теоретически получены временные зависимости амплитуды электрического поля терагерцового электромагнитного импульса из нескольких осцилляций для различных углов дифракции на щели в дальней зоне. Выявлено, что с ростом угла дифракции наблюдаются существенные изменения временной формы электрического поля исследуемого импульса, а также соответствующие изменения спектра. Сравнение результатов исследования показывает хорошее согласование расчетов и экспериментальных результатов. Полученные результаты могут быть использованы в импульсной терагерцовой оптике и спектроскопии.

Ключевые слова: оптика импульсов из малого числа колебаний электрического поля, импульсное терагерцовое излучение, дифракция на щели.

Введение

Терагерцовым (ТГц) обычно называют излучение, лежащее в интервале частот 0,1–10 ТГц, которое по длинам волн находится между инфракрасным и миллиметровым/субмиллиметровым диапазонами, от 0,03 мм до 3 мм. Исследования физики и техники ТГц излучения начались достаточно давно [1, 2], однако только с развитием фемтосекундной оптики и микроэлектроники в данной области наметился значительный сдвиг, возрос интерес к фундаментальным и прикладным исследованиям, были опубликованы первые монографии [3, 4]. Были созданы методы получения и детектирования ТГц излучения с использованием световых импульсов фемтосекундной длительности при возбуждении носителей заряда в фотополупроводниках и сверхпроводниках; с помощью оптического детектирования в $\chi^{(2)}$ нелинейных средах; при оптическом пробое газов излучением первой и второй гармоник фемтосекундного лазера [5–7].

Одним из фундаментальных явлений оптики является дифракция света, однако исследований пространственно-временной структуры при распространении сверхкороткого широкополосного импульса, обладающего сложной амплитудно-фазовой структурой, в достаточной мере не проводилось [8–11]. Экспериментально дифракцию импульсов из нескольких осцилляций электромагнитного поля для волн в видимом и ИК-диапазонах спектра на практике достаточно сложно изучать, так как практически нет возможности прямой регистрации амплитуды и фазы, и только итерационные процедуры расчета позволяют восстановить исходный временной или пространственный профиль [12, 13].

Экспериментальное изучение дифракции сверхкороткого импульса со сложной амплитудно-фазовой структурой стало возможным с появлением техники регистрации временных форм электрического поля импульса широкополосного ТГц излучения. ТГц волновой фронт при возбуждении фемтосекундными импульсами, как правило, представляет собой несколько колебаний электромагнитного поля и обладает сложной амплитудно-фазовой структурой, связанной как с процессом генерации и дальнейшей дифракцией на образованной апертуре, так и с влиянием дисперсии среды [14]. Целью настоящей работы являлось получение экспериментальных результатов и сравнение расчетных зависимостей для спектрально-временных форм электрического поля волны при дифракции импульсов из малого числа колебаний на примере ТГц излучения с широкополосным спектром и длительностью несколько пикосекунд. Особенность работы заключалась в прямой регистрации временных форм дифракции предельно короткого импульса, что было затруднительно в оптике импульсов из большого числа колебаний. Данное исследование может быть полезным при интерпретации результатов измерений в импульсной ТГц оптике и спектроскопии.

Математическая модель

Рассмотрим одномерную задачу об определении распределения электрического поля $E(t)$ дифрагированного излучения в дальней зоне плоской ТГц волны, падающей на бесконечную в направлении оси z щель шириной $2a$ в системе координат x, y, z . Исходное импульсное электрическое поле $E(t)$ для терагерцовой волны записывается в виде

$$E(t) = \frac{t}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right), \quad (1)$$

где t – время; τ – длительность импульса.

Комплексный спектр данного поля определяется прямым преобразованием Фурье:

$$G(v) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{t}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \cdot \exp(-i2\pi v \cdot t) dt, \quad (2)$$

где v – частота излучения.

Широкополосный спектр ТГц излучения (2) можно представить в виде суперпозиции монохроматических компонент, каждая из которых описывается волновым числом $k = \frac{2\pi v}{c}$. Далее для каждой отдельной монохроматической компоненты можно записать дифракционный интеграл Фраунгофера. Так как щель бесконечна в плоскости z , то волна отклоняется только в плоскости xy , а разложение поля проводится по поперечной координате x . Таким образом, пространственно-временной спектр в дальней зоне дифракции может быть записан в следующем виде:

$$G(v, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{t}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \cdot \exp(-i2\pi v \cdot t) dt \cdot \int_{-a}^a \exp(-ik'_y x) dx, \quad (3)$$

где

$$k'_y = \frac{2\pi v}{c} \sin(\theta), \quad (4)$$

c – скорость света в вакууме; a – половина ширины щели; k'_y – проекция волнового вектора дифрагированной ТГц волны на оптическую ось y ; θ – угол между k'_y и осью y .

С учетом (4) выражение (3) преобразуется в

$$G(v, \theta) = \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot a \cdot v}{c} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi \cdot a \cdot v}{c} \cdot \sin(\theta)} \right) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \cdot \exp(-i2\pi v \cdot t) dt. \quad (5)$$

Таким образом, получаем для каждого значения дифракционного угла θ и частоты соответствующий комплексный спектр дифракции. Временная форма ТГц импульса может быть получена с помощью обратного преобразования Фурье от выражения (5):

$$E(t, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} G(v, \theta) \cdot \exp(-i2\pi t \cdot v) dv. \quad (6)$$

Используя соотношения (5) и (6), можно рассчитать пространственно-временные картины дифракции импульсного ТГц излучения на щели. На рис. 1 показаны графики спектрального и временного дифракционного распределения для идеального ТГц импульса из одного колебания поля, задаваемого формулой (1). Видно, что с ростом угла дифракции θ наблюдаются изменения временной формы им-

пульса, а также соответствующие изменения спектра. Ширина спектра сужается, а центральная частота смещается в область низких частот, при этом появляются вторичные максимумы в спектре дифракции. Во временной области с ростом угла дифракции максимумы амплитуды поля импульса смещаются в противоположных друг от друга направлениях по оси времени, что свидетельствует об искривлении исходного плоского волнового фронта терагерцевой волны при дифракции.

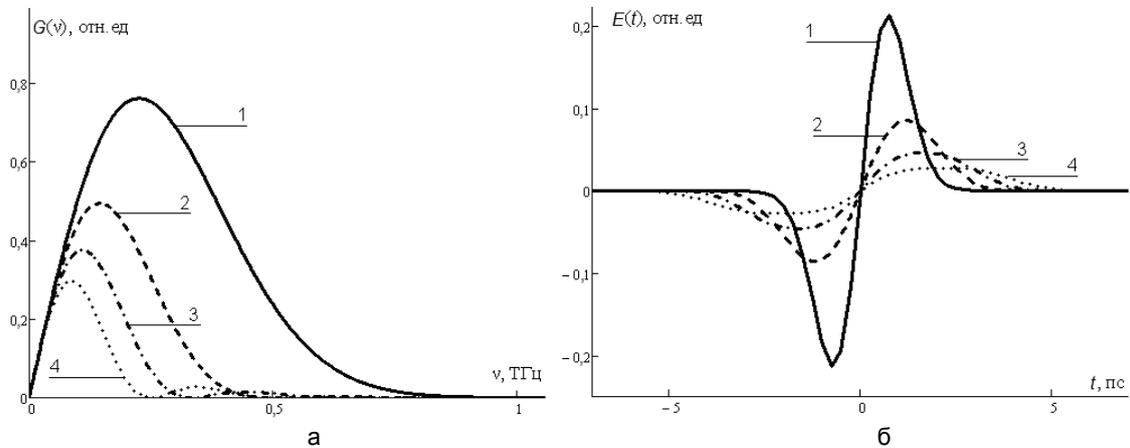


Рис. 1. Спектральное (а) и временное (б) распределение для дифрагированного идеального однопериодного ТГц импульса. Графики представлены для различных дифракционных углов: 1 – $\theta=0$ рад; 2 – $\theta=0,02$ рад; 3 – $\theta=0,03$ рад; 4 – $\theta=0,04$ рад. Ширина щели 300 мкм

Схема эксперимента

В схеме (рис. 2) лазерный пучок от фемтосекундного Yb: KYW лазера (длина волны $\lambda=1040$ нм; длительность импульса по уровню половинной ширины $\tau \approx 200$ фс; частота следования равна 80 МГц; средняя мощность $W_{cp}=1,2$ Вт) с помощью делителя пучка разделяется на пробный пучок и пучок накачки. Пучок накачки, пройдя через управляемую линию оптической задержки, попадает на полупроводниковый кристалл InAs, помещенный в постоянное магнитное поле, где происходит генерация ТГц излучения [6, 7]. Затем ТГц излучение коллимируется параболическим зеркалом диаметром 9 см, за которым находится тефлоновый фильтр, пропускающий ТГц излучение и рассеивающий мощное инфракрасное.

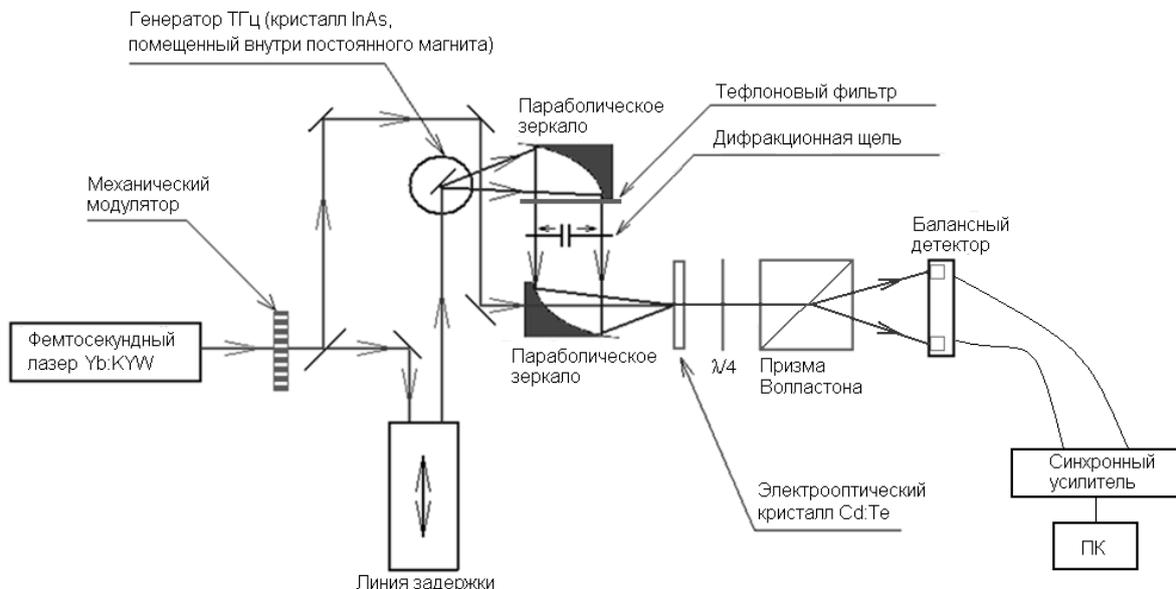


Рис. 2. Схема экспериментального исследования дифракции на щели ТГц импульса

Между двумя параболическими зеркалами помещается дифракционная щель из двух тонких алюминиевых пластин. Расстояние между металлическими пластинами выбиралось сопоставимым с длиной волны ТГц импульса для выполнения условия дифракции. Габаритные размеры сконструированной щели были равны апертуре сфокусированного пучка ТГц излучения, распространяющегося после первого параболического зеркала. Дифракционная щель закреплялась на микрометрической подвижке, таким

образом, обеспечивалась точность при перемещении щели поперек пучка, что было эквивалентно перемещению системы регистрации по пространственной картине дифракции.

Оптический импульс пробного пучка по мере распространения по электрооптическому кристаллу Cd:Te подвергается воздействию постоянного электрического поля ТГц импульса. При коллинеарном распространении в кристалле линейная поляризация пробного пучка изменяется до эллиптической. С помощью четвертьволновой пластинки линейная поляризация переводится в круговую, затем с помощью призмы Волластона пучки с разными состояниями поляризации разделяются и попадают на балансный детектор. Разность интенсивностей на диодах балансной схемы пропорциональна полю ТГц излучения. Затем сигнал с балансного детектора поступает на синхронный усилитель и далее на компьютер.

С помощью линии оптической задержки производится изменение времени пересечения ТГц излучения и пробного пучка в кристалле, и, таким образом, измеряя при различных задержках картину двулучепреломления, регистрируется зависимость амплитуды электрического поля ТГц импульса от времени.

Результаты эксперимента и сравнение с расчетными результатами

Для щели размером 5 мм (приблизительно 10 длин волн центральной длины волны ТГц излучения) были измерены зависимости поля $E(t)$ для ТГц импульса в поперечных точках пространственной картины – 0 мм, 5 мм, 10 мм, 15 мм, 20 мм, 25 мм, 30 мм, что соответствовало углам дифракции 0 рад, 0,016 рад, 0,033 рад, 0,049 рад, 0,065 рад, 0,098 рад, 0,13 рад. Полученные экспериментальные зависимости $E(t)$ имели дополнительный уровень шума вследствие того, что щель пространственно обрезала часть падающего излучения: для координаты 0 мм соотношение сигнал/шум составляло 30:1, для координаты 30 мм это значение достигало 10:1. Методами численной обработки шум частично устранялся, при вычислениях использовался фильтр, пропускающий низкие частоты и обрезающий высокие частоты, соответствующие шуму. По полученной временной форме $E(t)$ были рассчитаны спектры дифракции ТГц импульса. Спектральная и временная формы дифрагированного импульса в центре нулевого максимума дифракции, полученные экспериментально, приведены на рис. 3. Временная зависимость исходного импульса представляет собой одно полнопериодное колебание, за которым следуют хаотические выбросы различной полярности, связанные с дисперсией воздуха и поглощением в водных парах. Из графика следует, что амплитуда отрицательного выброса на переднем фронте импульса превышает амплитуду отрицательного выброса на заднем фронте, а спектр излучения сосредоточен в области 0,1–1,2 ТГц.

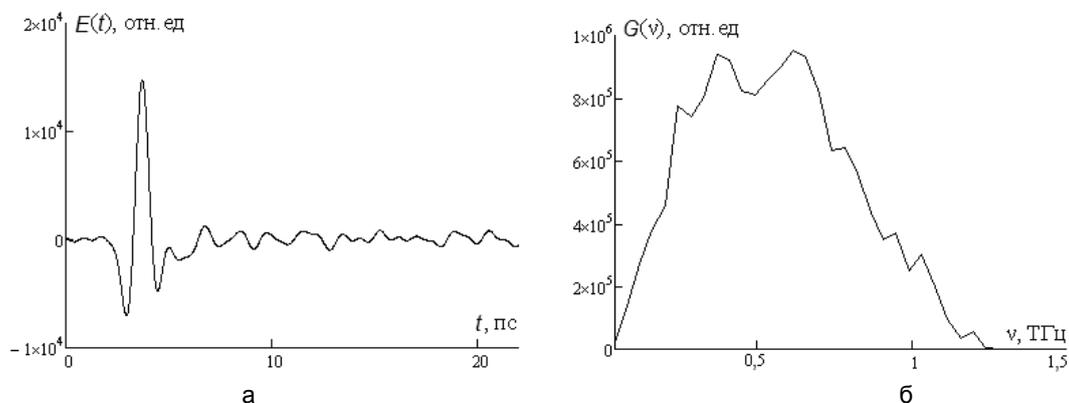


Рис. 3. Поле (а) и спектр (б) терагерцовой волны в центре нулевого максимума дифракции

Представленное на рис. 3 поле $E(t)$ является входным для численного расчета, описанного в разделе «Математическая модель». Далее приведены зависимости для дифрагированного на щели ТГц импульса в разных характерных поперечных точках пространственной картины дифракции (рис. 4). Сплошной линией представлены экспериментальные результаты, пунктирной – расчетные.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что с ростом угла дифракции наблюдается сужение спектра импульса и изменение его фазовых характеристик. С увеличением угла дифракции форма исходного импульса (полнопериодного колебания) претерпевает изменения, амплитуда отрицательного выброса на заднем фронте постепенно увеличивается и в крайних точках уже превышает отрицательную амплитуду на переднем фронте, что свидетельствует об изменении фазы колебания. Ширина спектра по половинному уровню монотонно уменьшается и при угле дифракции 0,13 рад составляет ~ 0,25 ТГц. С ростом угла дифракции центральная частота импульса также смещается в низкочастотную область (с 0,75 ТГц до 0,25 ТГц), у спектра дифракции появляется вторичный максимум. Таким образом, дифракционная щель ведет себя как пространственно-временной фильтр.

При сравнении экспериментальных результатов с расчетными наблюдается хорошее согласование. Однако в точке 25 мм видно, что передний фронт расчетного импульса начинает опережать передний фронт экспериментального импульса, что еще сильнее проявляется в точке 30 мм. Это говорит о возможном искривлении исходного плоского волнового фронта ТГц импульса при приближении к краю пространственной дифракционной картины.

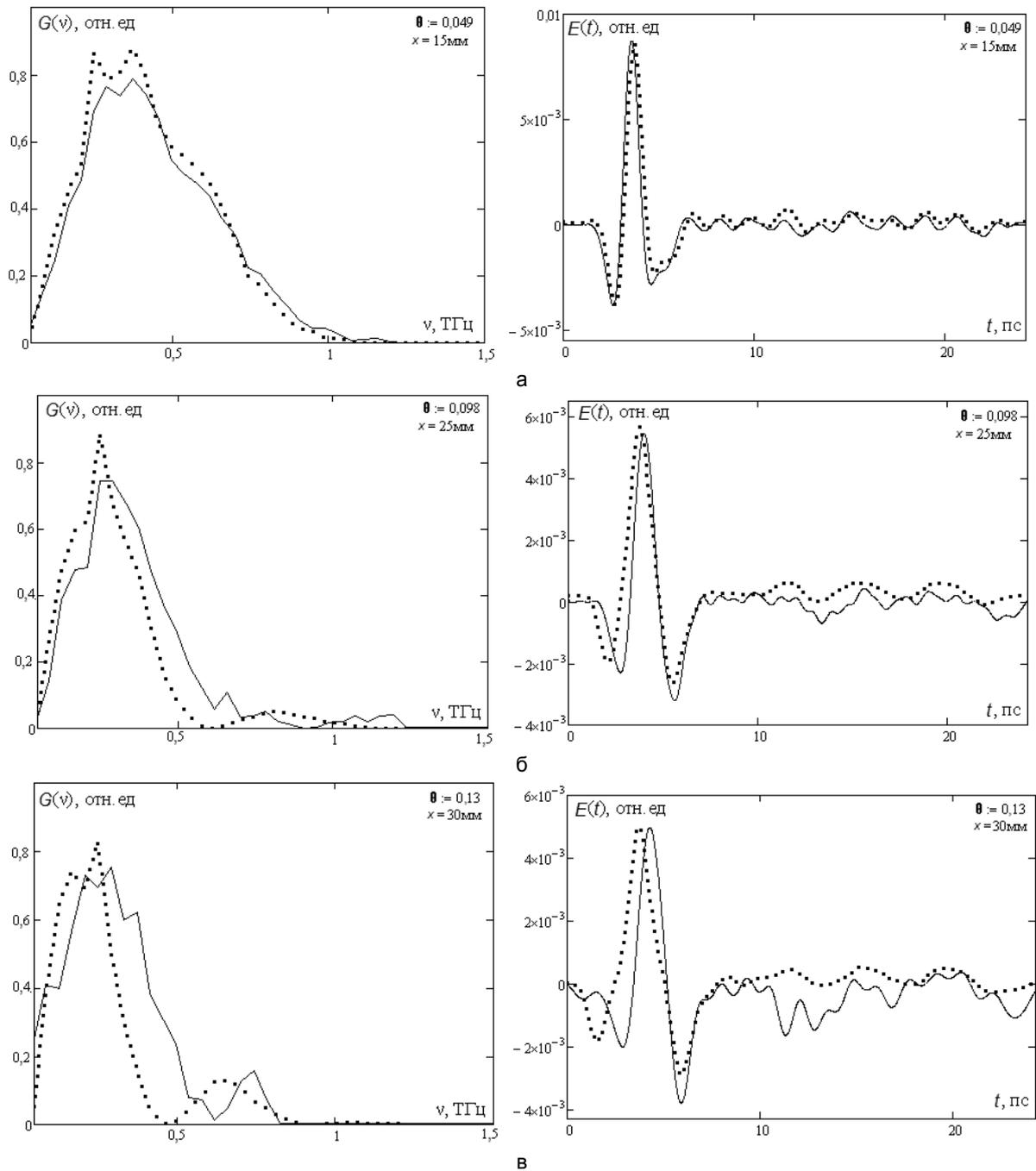


Рис. 4. Спектры (слева) и поля (справа) дифрагированных волн для пространственных точек : а) 15 мм; б) 25 мм; в) 30 мм. Сплошная линия соответствует экспериментальным результатам, пунктирная – расчетным результатам. θ – угол дифракции в радианах; x – положение щели в поперечных координатах

Заключение

Проведен численный расчет дифракции ТГц волны на щели. Предложена схема и собрана экспериментальная установка для проведения исследования дифракции на щели однопериодного ТГц импульса. Проведен эксперимент, зарегистрированы временные формы дифракции предельно короткого ТГц электромагнитного импульса для различных углов дифракции на щели. По экспериментальным зависимостям поля от времени получены спектры дифракции. Выявлено, что с ростом угла дифракции проис-

ходит изменение временной формы ТГц импульса, при этом центральная частота смещается в более низкочастотную область, в спектре дифракции появляется вторичный максимум, что также подтверждается численными расчетами. По результатам сравнения расчета с экспериментом сделано предположение о возможном искривлении исходного плоского волнового фронта импульса при приближении к краю пространственной дифракционной картины.

Стоит также отметить, что ранее в работе [10] теоретически изучалась дифракция Фраунгофера ТГц волны в параксиальном приближении (дифракция на оптической оси), где показано изменение временной структуры импульса и смещение спектра в высокочастотную область. В настоящей работе рассматривался другой случай – непараксиальная дифракция, т.е. дифракция под большими углами к оптической оси. Этим обусловлено отличие результатов в части смещения спектра дифракции: смещение в высокочастотную область спектра при параксиальном случае и смещение в низкочастотную область с появлением вторичного максимума при непараксиальном случае. На следующем этапе исследований планируется проведение эксперимента с целью верификации искривления исходного плоского волнового фронта сверхкороткого ТГц импульса при дифракции.

Работа выполнена в рамках работы по госконтракту № 16.513.11.3070 от 19 апреля 2011 года.

Литература

1. Glagolewa-Arkadiewa A. Short electromagnetic waves of wave-length up to 82 microns // Nature. – 1924. – V. 113. – № 2844. – P. 640.
2. Геккер И.В., Юрьев В.И. Субмиллиметровые волны. – М.-Л. – Госэнергиздат, 1961. – 60 с.
3. Zhang X.C., Xu J. Introduction to THz wave photonics. – NY: Springer, 2009. – 246 p.
4. Lee Yun-Shik. Principles of terahertz science and technology. – Springer Science+Business Media, LLC, XII. 2009. – 340 p.
5. Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Путилин С.Э., Стаселько Д.И. Генерация излучения в дальнем ИК диапазоне спектра при фемтосекундном оптическом возбуждении полупроводника InAs в магнитном поле // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 93. – № 1. – С. 158–162.
6. Беспалов В.Г. Сверхширокополосное импульсное излучение в терагерцовой области спектра: получение и применение // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73. – № 11. – С. 28–37.
7. Беспалов В.Г., Ефимов Ю.Н., Милогладов Э.В. Генерация субпикосекундного терагерцового излучения в скрещенных электрическом и магнитном полях // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – № 15. – С. 41–44.
8. Розанов Н.Н. О дифракции предельно коротких импульсов // Оптика и спектроскопия. – 2003. – Т. 95. – № 2. – С. 327–330.
9. Sereda L., Ferrari A., Bertolotti M. Spectral and time evolution in diffraction from a slit of polychromatic and nonstationary plane waves // J. Opt. Soc. Am. – 1996. – V. 13. – P. 1394–1402.
10. Езерская А.А., Иванов Д.В., Беспалов В.Г., Козлов С.А. Дифракция однопериодных терагерцовых волн с гауссовым поперечным распределением // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (71). – С. 10–16.
11. Jingzhou U., WANG Li & YANG Guozhen. Effects of spectral linewidth of ultrashort pulses on the spatio-temporal distribution of diffraction fields // Chinese Science Bulletin. – June 2001. – V. 46. – № 11. – P. 901–904.
12. Iaconis C. and I.A. Walmsley. Spectral phase Interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses // Optics Letters. – 1998. – V. 23. – P. 792–794.
13. Петров Н., Беспалов В., Волков М. Восстановление волнового фронта при безопорной цифровой ПЗС-регистрации мультиспектральных спекл картин // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2011. – Т. 2. – № 1. – С. 82–90.
14. Hu B.B., Zhang X.-C. and D.H. Auston. Terahertz Radiation Induced by Subbandgap Femtosecond Optical Excitation of GaAs // Phys. Rev. Lett. – 1991. – V. 67. – P. 2709.

Куля Максим Сергеевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, maxk2350@yandex.ru

Грачев Ярослав Владимирович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, gachev_y@mail.ru

Городецкий Андрей Александрович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник, andrei.gorodetsky@gmail.com

Беспалов Виктор Георгиевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, victorbespaloff@gmail.com

УДК 621.311.6: 621.327.7+ 621.3.011.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНОЙ
КСЕНОНОВОЙ ЛАМПЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ТОКА НАКАЧКИ
ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ

Ю.А. Мандрыко, В.В. Тогатов

Проведено исследование физических процессов при формировании импульса тока накачки в плазменном канале импульсной ксеноновой лампы в режиме ограничения тока накачки внешней электрической цепью.

Ключевые слова: импульс тока накачки, плазменный канал, электрическая цепь.

Введение

Анализ физических процессов формирования плазменного канала в импульсных ксеноновых лампах (ИКЛ) выполнен в ряде работ [1–5], однако в указанных работах не учитывалось влияние на эти процессы специфики электрического режима, обусловленного конкретной электрической схемой накачки ИКЛ. За последние десять лет радикально изменилась элементная база силовой электроники, что привело к соответствующему изменению схемотехники систем накачки импульсных ламп [6].

С точки зрения режима работы импульсной ксеноновой лампы электрические схемы накачки могут быть разделены на две группы: схемы, в которых ток накачки определяется физическими процессами в ИКЛ, и схемы, в которых ток накачки определяется параметрами разрядного контура накачки и почти не зависит от физических процессов в ИКЛ.

В настоящей работе проанализированы электрические и оптические характеристики ИКЛ, работающей в электрической схеме накачки на основе LC-контура, в которой ток через ИКЛ ограничивается параметрами разрядного контура накачки.

Анализ электрических процессов в разрядном контуре накачки импульсной ксеноновой лампы

Электрическая схема накачки ИКЛ на основе LC-контура представлена на рис. 1.

При расчете физических параметров электрической схемы накачки ИКЛ будем считать заданными: электрическую энергию $W_{эл}$, поданную в ИКЛ за длительность импульса тока накачки; длительность импульса тока накачки t_T ; характеристический импеданс K_0 ИКЛ; емкость конденсатора C_k ; установившиеся величины напряжения $U_{л.д}$ между электродами ИКЛ и тока I_d в ИКЛ на стадии поддержания тока дежурной дуги. Характеристический импеданс является параметром квазистатической вольт-амперной характеристики ИКЛ [1, 6]:

$$u_{л} = K_0 \cdot \sqrt{i_{л}},$$

где $u_{л}$ – мгновенное напряжение между электродами ИКЛ. Для расчета мгновенного тока накачки $i_{л}$ в ИКЛ вводится эквивалентное активное сопротивление ИКЛ $R_{э.кв}$. Величина эквивалентного активного сопротивления ИКЛ выбирается из условия равенства поступившей в нее электрической энергии за длительность импульса тока накачки при реальной и линеаризованной вольт-амперных характеристиках ИКЛ [6]. Для расчета эквивалентного активного сопротивления ИКЛ $R_{э.кв}$ вводится эффективное значение характеристического импеданса $K_{0,э}$ [6]:

$$R_{э.кв} = (K_{0,э})^3 \cdot \left(\frac{t_T}{W_{эл}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

При переходном процессе в разрядном контуре импульс тока накачки в ИКЛ описывается формулой [6]

$$i_{л} = \frac{U_c(0) - U_{л.д}}{L_{др} \cdot \sqrt{|\delta^2 - \omega_0^2|}} \cdot \exp(-\delta \cdot t) \cdot \sin\left(\left(\sqrt{|\delta^2 - \omega_0^2|}\right) \cdot t\right) + I_d, \quad (1)$$

$$\text{где } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{др} \cdot C_k}}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{R_{э.кв}}{2 \cdot L_{др}}. \quad (3)$$

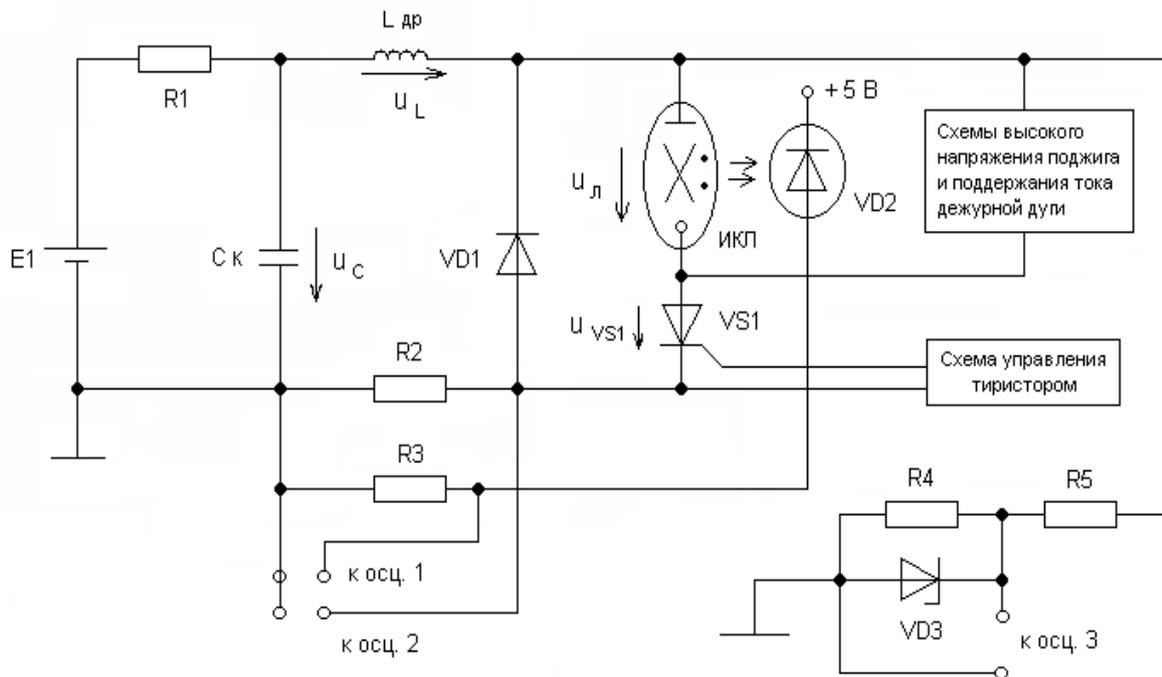


Рис. 1. Электрическая схема накачки импульсной ксеноновой лампы на основе LC-контура: $R_1=510 \text{ Ом}$ (75 Вт); $R_2=0,1 \text{ Ом}$ (5 Вт); $R_3=510 \text{ кОм}$ (0,25 Вт); $R_4=75 \text{ кОм}$ (0,5 Вт); $R_5=2,2 \text{ МОм}$ (1 Вт); $C_k=100 \text{ мкФ}$ (500 В); $L_{др}=60 \text{ мкГн}$; диод VD1 типа FR607; фотодиод VD2 типа BPW21R; стабилитрон VD3 типа KC522A; тиристор VS1 типа КУ239А; стабилизатор напряжения типа LM7805С, $E_1=300 \text{ В}$; осциллографы 1, 2, 3 типов: HPS10, HPS40, HPS50 и APS230; ИКЛ типа ИСП250

Определим длительность импульса тока накачки как временной интервал с начала формирования импульса до момента уменьшения тока накачки до установившейся величины тока дежурной дуги. При этом определении справедливо равенство, которое следует из (1):

$$\left(\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \right) \cdot t_T = \pi. \quad (4)$$

Подставив выражения из (2) и (3) в (4) и решив полученное квадратное уравнение относительно индуктивности дросселя, приходим к формуле для расчета величины индуктивности дросселя:

$$L_{др} = \frac{1}{2 \cdot C_k} \cdot \left(\frac{t_T}{\pi} \right)^2 \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{R_{экв} \cdot C_k \cdot \pi}{t_T} \right)^2} \right].$$

Если параметры разрядного контура накачки выбраны оптимально, то почти вся электрическая энергия W_c , запасенная в конденсаторе, поступает в ИКЛ. В этом случае начальное напряжение на конденсаторе, равное электродвижущей силе источника питания разрядного контура накачки, можно оценить по формуле [6]

$$U_c(0) = E_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot W_c}{C_k}} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot W_{эл}}{C_k}}.$$

Анализ физических процессов в импульсной ксеноновой лампе

Процессы формирования плазменного канала в импульсной ксеноновой лампе включают в себя следующие стадии развития плазменного дугового разряда: стадию увеличения ионной температуры неравновесного плазменного канала (в состав которой входит стадия расширения плазменного канала), стадию увеличения температуры равновесного плазменного канала вплоть до максимальной величины, стадию уменьшения температуры равновесного плазменного канала при снижении тока накачки в ИКЛ до установившейся величины тока дежурной дуги.

Фронт импульса тока накачки в ИКЛ, определяемый параметрами разрядного контура накачки, формирует стадии увеличения ионной температуры неравновесного плазменного канала и увеличения температуры равновесного плазменного канала. Срез импульса тока накачки в ИКЛ, также определяемый параметрами разрядного контура накачки, формирует стадию уменьшения температуры равновес-

ного плазменного канала. Таким образом, на всех стадиях формирования плазменного канала переходный ток накачки в ИКЛ рассчитывается по формуле (1).

Так как в случае ограничения тока накачки в ИКЛ внешней электрической цепью темп увеличения тока накачки ограничивается не физическими процессами в импульсной ксеноновой лампе, а электрическими параметрами разрядного контура накачки, то физические процессы формирования плазменного канала в этих условиях можно считать квазистационарными.

Стадия расширения плазменного канала. Электрическая энергия, поступившая в ИКЛ за время любой стадии, рассчитывается по формуле

$$W_{эл,i} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} N_{эл} \cdot dt = \int_{t_i}^{t_{i+1}} i_{л} \cdot u_{л} \cdot dt, \quad (5)$$

где $i = 0, 1, 2, 3$ – индексы, соответствующие началам и окончаниям последовательно проходящих стадий формирования плазменного канала; $N_{эл}$ – электрическая мощность, поступающая в плазменный канал; $t \in (0; t_1)$ при $t = 0$ для данной стадии.

Электрическая мощность, поступающая в положительный столб плазменного канала, рассчитывается [4, 5] как

$$N_{эл,ст} = i_{л} \cdot u_{ст}.$$

Падение напряжения между краями положительного столба плазменного канала рассчитывается по формуле

$$u_{ст} = u_{л} - U_a - U_k,$$

где U_a – падение напряжения на прианодной области плазменного канала; U_k – падение напряжения на прикатодной области плазменного канала.

Импульсная ксеноновая лампа типа ИСП 250 излучает в спектральном диапазоне длин волн $\lambda \in [\lambda_1 = 180 \text{ нм}; \lambda_2 = 1100 \text{ нм}]$ [1–3]. Мощность излучения ИКЛ рассчитывается по [7]:

$$N_{изл} = \gamma_1 \cdot \frac{8 \cdot \pi \cdot h}{c^2} \cdot A_k \cdot \left(\frac{k \cdot T_э}{h} \right)^4 \cdot s_{б,к} \cdot \int_{\frac{T_{изл,2}}{T_э}}^{\frac{T_{изл,1}}{T_э}} \frac{x^3}{\exp(x) - 1} \cdot dx. \quad (6)$$

Средний спектральный относительный коэффициент излучения A_k цилиндрического ксенонового плазменного канала получен авторами с использованием [3, 8] и рассчитывается по формуле

$$A_k \approx 1 - \exp \left[- \frac{B_1 \cdot R_{\Gamma} \cdot \rho_{пл} \cdot 2 \cdot r_k \cdot T_{и}}{\left(1 - b_{кр} \cdot \frac{\rho_{пл}}{M_1} \right) \cdot M_1 \cdot (T_э)^3} \cdot \exp \left(- \frac{j_{и,а}}{k \cdot T_э} \right) \right], \quad (7)$$

где $T_{изл,1} = \frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda_1}$; $T_{изл,2} = \frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda_2}$; γ_1 – относительный коэффициент пропускания излучения кварцевых стенок колбы ИКЛ; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме;

$k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $B_1 = 7,9 \cdot 10^{13}$ К³/(Па·м) [3]; $R_{\Gamma} = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; $\rho_{пл}$ – плотность плазмы; $M_1 = 0,1313$ кг/моль – молярная масса ксенона;

$a_{кр} = \left(\frac{T_{кр} \cdot R_{\Gamma}}{8} \right)^2 \cdot \frac{27}{P_{кр}}$, $b_{кр} = \frac{T_{кр} \cdot R_{\Gamma}}{8 \cdot P_{кр}}$ – критические постоянные из уравнения Ван-дер-Ваальса;

$T_{кр} = 289,734$ К – критическая температура ксенона; $P_{кр} = 5,84$ МПа – критическое давление ксенона; $T_{и}$ – ионная температура плазменного канала; $T_э$ – электронная температура плазменного канала; r_k – радиус плазменного канала; $j_{и,а}$ – энергия излучения атома ксенона.

Энергия излучения атома ксенона на стадии расширения плазменного канала равна $j_{и,а} = j_{и,а,эфф} \cdot 0,3$, где $j_{и,а,эфф} = 1,875 \cdot 10^{-18}$ Дж – эффективная энергия излучения атома ксенона. Электронная температура ксенонового плазменного канала $T_э$ на стадии его расширения равна электронной температуре образования ксеноновой плазмы $T_{э,0} = 6400$ К: $T_э = T_{э,0}$. Плотность плазмы $\rho_{пл}$ на данной

стадии равна электронно-ионной плотности $\rho_{э,и}$ в плазменном канале и рассчитывается по формуле, выведенной авторами с использованием [1, 4–6, 8, 9]:

$$\rho_{пл} = \rho_{э,и} = (m_{и} + m_{э}) \cdot \frac{(K_0 \cdot \sqrt{i_{л}} - U_a - U_k) \cdot D_1 \cdot T_3^{\frac{3}{2}}}{H_1 \cdot e \cdot \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{N_{э,а} \cdot k}{m_{э}}}},$$

где $N_{э,а} = 8$ – число валентных электронов в атоме ксенона; $m_{и} = 2,18 \cdot 10^{-25}$ кг – масса иона ксенона; $m_{э} = 9,1095 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона; $D_1 = 3,2 \cdot 10^{-5}$ См/(м·К²) [1]; H_1 – длина разрядного промежутка ИКЛ, примерно равная расстоянию между электродами ИКЛ; $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

Площадь боковой поверхности и радиус расширяющегося плазменного канала определяются с использованием [1, 4–6]:

$$S_{б,к} = 2 \cdot \pi \cdot H_1^2 \cdot \sqrt{\frac{i_{л}}{\pi \cdot \sigma_k \cdot (K_0 \cdot \sqrt{i_{л}} - U_a - U_k)}},$$

$$r_k = \sqrt{\frac{H_1 \cdot i_{л}}{\pi \cdot \sigma_k \cdot (K_0 \cdot \sqrt{i_{л}} - U_a - U_k)}},$$

где σ_k – удельная электрическая проводимость плазменного канала.

Ионная температура расширяющегося плазменного канала определяется по [8]:

$$T_{и} = T_{и,д}(I_{д}) + \frac{1}{\alpha_k} \cdot \ln \left(\frac{i_{л}}{I_{д}} \right),$$

где $\alpha_k = 1,087 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ – коэффициент объемного расширения неравновесного плазменного канала; $T_{и,д}$ – установившаяся ионная температура плазменного канала на стадии поддержания тока дежурной дуги; $I_{д}$ – установившийся ток дежурной дуги.

Стадия увеличения температуры равновесного плазменного канала. Электрическая энергия $W_{эл,2}$, поступившая в ИКЛ за время этой стадии $t_{21} = t_2 - t_1$, рассчитывается по (5) при $t \in (t_1; t_2)$, $i = 1$. На рассматриваемой стадии ионная температура плазменного канала равна его электронной температуре $T_{и} = T_{э}$. Плотность ксеноновой плазмы $\rho_{пл}$ в равновесном плазменном канале равна плотности ксенона ρ_1 в ИКЛ $\rho_{пл} = \rho_1$, находящегося при температуре $T_0 = 300$ К и давлении $P_0 = 80$ кПа [2, 3]. Площадь боковой поверхности равновесного плазменного канала равна $S_{б,к} = S_{б,3}$, где $S_{б,3}$ – максимально возможная площадь боковой поверхности плазменного канала, установившегося по объему, определяемая по формуле

$$S_{б,3} = 2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot H_1,$$

где R_3 – максимально возможный радиус плазменного канала, установившегося по объему, $r_k = R_3$.

Мгновенная температура $T_{и}$ цилиндрического равновесного плазменного канала связана с током накачки $i_{л}$ в ИКЛ следующей эмпирической зависимостью [1, 4–6]:

$$T_{и} = T_3 = \sqrt{\frac{\sigma_k}{D_1}} = \sqrt{\frac{H_1 \cdot i_{л}}{\pi \cdot R_3^2 \cdot D_1 \cdot (K_0 \cdot \sqrt{i_{л}} - U_a - U_k)}}, \quad (8)$$

где $D_1 = 3,2 \cdot 10^{-5}$ См/(м·К²).

В начале стадии увеличения температуры равновесного плазменного канала его температура $T_{и}(t_1)$ равна электронной температуре образования плазмы $T_{э,о}$, а величина тока накачки в ИКЛ рассчитывается по формуле

$$i_{л}(t_1) = \left(D_1 \cdot T_{э,о}^2 \cdot K_0 \cdot \pi \cdot \frac{R_3^2}{H_1} \right)^2.$$

Мощность излучения ИКЛ на рассматриваемой стадии определяется по формуле (6), а средний спектральный относительный коэффициент излучения A_k цилиндрического плазменного канала рассчитывается по формуле (7).

Стадия уменьшения температуры равновесного плазменного канала. Электрическая энергия $W_{эл.3}$, поступившая в ИКЛ за время данной стадии $t_{32} = t_3 - t_2$, рассчитывается по формуле (5) при $t \in (t_2; t_3)$, $i = 2$. На этой стадии $T_{и} = T_3$; $\rho_{пл} = \rho_1$; $s_{б.к} = S_{б.3}$; $r_k = R_3$. Мгновенная температура T_3 цилиндрического равновесного плазменного канала связана с током накачки $i_{д}$ в ИКЛ по формуле (8). Мощность излучения ИКЛ на текущей стадии рассчитывается по формуле (6). При этом на рассматриваемой стадии средний спектральный относительный коэффициент излучения A_k цилиндрического равновесного плазменного канала достигает максимальной величины, так как плазма насыщена собственным излучением.

Отношение энергии излучения ИКЛ $W_{изл}$ за $t_T = t_3$ к электрической энергии $W_{эл}$, поданной за t_T в ИКЛ, определяет средний коэффициент полезного действия (КПД) ИКЛ $\langle \eta_{л} \rangle$:

$$\langle \eta_{л} \rangle = \frac{W_{изл}}{W_{эл}} = \frac{\int_0^{t_1} N_{изл.1} \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} N_{изл.2} \cdot dt + \int_{t_2}^{t_3} N_{изл.3} \cdot dt}{\int_0^{t_1} N_{эл.1} \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} N_{эл.2} \cdot dt + \int_{t_2}^{t_3} N_{эл.3} \cdot dt} \quad (9)$$

Расчет переходных характеристик ИКЛ выполнен при следующих начальных физических параметрах: $U_{л.д} = 48$ В, $I_{д} = 0,9$ А, $U_a = U_k = 3$ В, $R_3 = 2,3 \cdot 10^{-3}$ м, $H_1 = 40 \cdot 10^{-3}$ м, $T_{3,о} = 6400$ К, $\lambda_1 = 1,8 \cdot 10^{-7}$ м, $\lambda_2 = 1,1 \cdot 10^{-6}$ м, $\gamma_1 = 0,92$, $\rho_1 = 4,234$ кг/м³ – плотность ксенона в ИКЛ при температуре $T_0 = 300$ К и давлении $P_0 = 80$ кПа; $\rho_{пл.д} = 0,721$ кг/м³, $T_{и.д} = 2450$ К, $P_{пл.д} = 111,9$ кПа, $A_{пл.д} = 1,88 \cdot 10^{-5}$, $R_{к.д} = 4,562 \cdot 10^{-4}$ м – плотность, ионная температура, давление, средний спектральный относительный коэффициент излучения и радиус плазменного канала на стадии поддержания тока дежурной дуги соответственно.

Эксперимент

Экспериментально исследовалась эффективность накачки импульсной ксеноновой лампы типа ИСП 250, работающей в электрической схеме накачки, представленной на рис. 1. Выбор параметров разрядного контура накачки производился по методике, изложенной в разделе «Анализ электрических процессов в разрядном контуре накачки импульсной ксеноновой лампы».

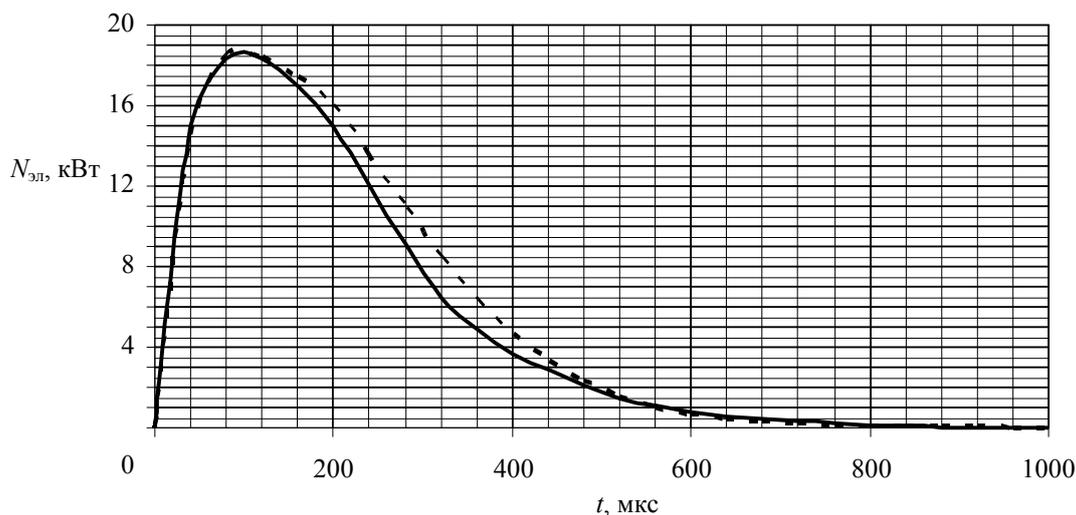


Рис. 2. Переходные характеристики электрической мощности, поступающей в импульсную ксеноновую лампу: пунктирная линия – расчетная кривая; сплошная – экспериментальная кривая

На рис. 2 представлены экспериментальная (сплошная кривая) и расчетная (пунктирная кривая) переходные характеристики $N_{изл}$ при следующих величинах физических параметров: $K_{0,3} = 11,7$ В/А^{1/2}; $K_0 \in [10; 15]$ В/А^{1/2}; $t_T = 1000$ мкс; $W_c = 4,5$ Дж – электрическая энергия в конденсаторе при $C_k = 100$ мкФ

и $U_c(0) = 300 \text{ В}$; $W_{эл} \approx W_c$. Экспериментальная кривая сравнивается с расчетной кривой электрической мощности, рассчитанной по (5). Расчетная и экспериментальная кривые приемлемо согласуются по форме импульса и порядку измеренных величин. Некоторое различие теоретической и расчетной кривых связано с неточностью линейаризации реального переходного процесса.

На рис. 3 приведена характеристика $N_{изл}$ в процессе формирования импульса накачки, рассчитанная по (6).

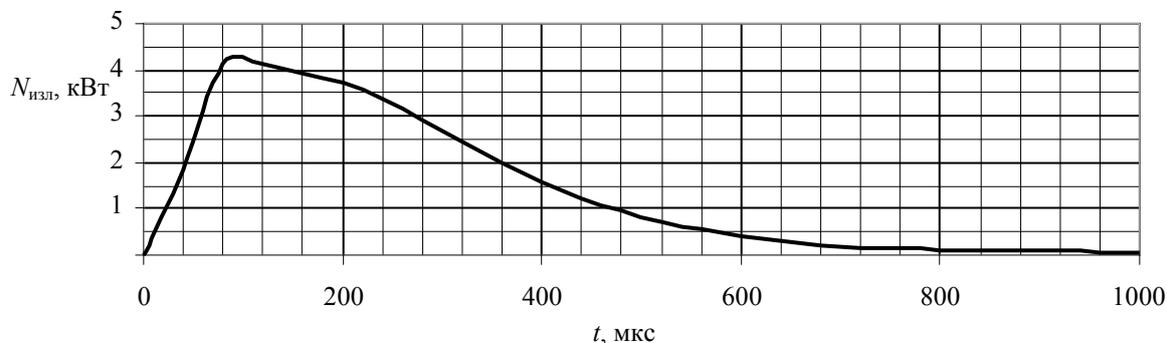


Рис. 3. Расчетная переходная характеристика мощности излучения импульсной ксеноновой лампы

Из рис. 2, 3 с учетом формулы (9) следует, что при $W_{эл} = 4,5 \text{ Дж}$ энергия излучения $W_{изл} = 1,4 \text{ Дж}$ и $\langle \eta_{л} \rangle \approx 0,3 = 30\%$ за время импульса тока накачки $t_T = 1000 \text{ мкс}$.

На рис. 4 приведены переходные характеристики экспериментальной и расчетной нормированных мощностей излучения $\|N_{изл}\|$ относительно их амплитудных величин.

Экспериментальная нормированная переходная характеристика мощности излучения ИКЛ снята с фотодиода VD₂. Расчетная и экспериментальная кривые приемлемо согласуются как по форме, так и по порядку измеренных величин, однако расчетная кривая мощности излучения ИКЛ резче спадает во времени, чем экспериментальная. Указанное различие в ходе кривых связано с тем, что в предложенной методике расчета не учтена излучательная рекомбинация на стадии уменьшения температуры равновесного плазменного канала.

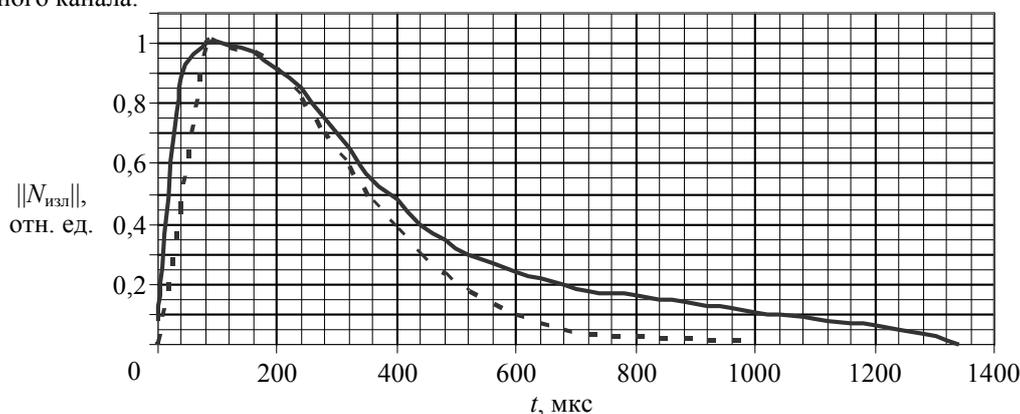


Рис. 4. Переходные характеристики нормированной мощности излучения импульсной ксеноновой лампы: пунктирная линия – расчетная кривая; сплошная – экспериментальная кривая

Заключение

- В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований:
- показано, что в зависимости от электрической схемы накачки импульсная ксеноновая лампа может работать в одном из двух режимов: в режиме ограничения тока накачки внешней электрической цепью (разрядным контуром накачки импульсной ксеноновой лампы) и при ограничении тока самой лампой;
 - разработана методика расчета электрической схемы накачки импульсной ксеноновой лампы на основе LC-контура, которая реализует режим ограничения тока накачки внешней электрической цепью;
 - представлен анализ физических процессов в электрической схеме и в импульсной ксеноновой лампе при работе в режиме ограничения тока накачки внешней электрической цепью;

- построена физико-математическая модель процесса формирования плазменного канала в импульсной ксеноновой лампе в течение импульса тока накачки при ограничении тока внешней электрической цепью;
- определен средний КПД преобразования электрической энергии, поступившей в импульсную ксеноновую лампу за время импульса тока накачки, в энергию излучения ее при ограничении тока внешней электрической цепью;
- показано, что на стадии увеличения температуры равновесной плазмы ксеноновая плазма насыщается собственным излучением, поэтому при максимальной температуре равновесного плазменного канала и на стадии уменьшения температуры равновесной плазмы относительный коэффициент излучения плазменного канала достигает максимальной величины, которая составляет сотые доли относительных единиц.

Литература

1. Мак А.А., Яшин В.Е., Сомс Л.Н., Фромзель В.А. Лазеры на неодимовом стекле. – М.: Наука, 1990. – 288 с.
2. Маршак И.С. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978. – 472 с.
3. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
5. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. – М.: Наука, 1980. – 415 с.
6. Тогатов В.В., Гнатюк П.А., Мандрыко Ю.А., Виноградов А.Г. Анализ импульсных источников питания твердотельных лазеров // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – Т. 43. – № 1. – С. 80–88.
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – 2-е изд. – М.: Наука, 1966. – 688 с.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. – 591 с.
9. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Справочник по атомной и молекулярной физике. – М.: Атомиздат, 1980. – 240 с.

- Мандрыко Юрий Анатольевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ст. преподаватель, mandryko1@rambler.ru
- Тогатов Вячеслав Вячеславович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, v.togatov@mail.ru

УДК 608.2

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ АТОМНО-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ И ГЕНЕРАТОРА ГИДРИДОВ

Е.А. Быковская, И.Б. Максакова

Рассмотрена необходимость разработки новой методики измерений массовой концентрации токсичных металлов в пробах воды, в целях чего создан новый универсальный аналитический комплекс на основе атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой и генератора гидридов. Оценены режимы работы спектрометра с подключением генератора гидридов и без него. Исследована работа универсального аналитического комплекса в зависимости от скорости подачи инертного газа-носителя. Установлено, что следует продолжить дальнейшие исследования по определению дозирования реагентов для уменьшения чувствительности и увеличения диапазона работы комплекса, что даст возможность определения загрязняющих веществ на низких уровнях содержания, с учетом естественного фона и с большей чувствительностью и точностью.

Ключевые слова: атомно-эмиссионная спектрометрия, генерация гидридов, мышьяк, сурьма, экологический мониторинг, методика измерений.

Введение

В результате активного воздействия цивилизации на окружающую среду степень загрязнения последней возрастает с каждым годом. Среди всех загрязняющих окружающую среду веществ выделяется особая группа – металлы, представляющие наибольший интерес не только из-за их высокой токсичности, но и из-за их стабильности в водной среде. Попав в экосистему, тяжелые металлы совершают круговорот, никуда не исчезая, а лишь мигрируя по различным ее звеньям. Прежде всего интерес представляют те металлы, которые в наибольшей степени загрязняют атмосферу из-за использования их в значитель-

ных объемах в производственной деятельности. В результате накопления во внешней среде они представляют серьезную опасность с точки зрения их биологической активности и токсических свойств. К таким металлам относят: свинец, ртуть, кадмий, цинк, висмут, кобальт, никель, медь, олово, сурьму, ванадий, марганец, хром, молибден и мышьяк.

В настоящее время существует несколько методов химического и физико-химического анализа для определения содержания металлов: химические (титриметрический, гравиметрический), спектральные и электрохимические. Однако химические и электрохимические методы не позволяют определять содержание некоторых металлов с достаточной чувствительностью и избирательностью.

Наиболее часто применяемыми методами определения токсичных металлов в воде являются спектральные методы: фотометрический, спектрофотометрический, рентгено-флуоресцентный, атомно-абсорбционный, атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП), масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой [1].

Одной из основных задач экологического мониторинга является выяснение причин загрязнения – наличие природных компонентов или влияние антропогенной деятельности человека. Например, такие металлы, как мышьяк (As) и сурьма (Sb), могут попадать в природные воды как от естественных, так и от антропогенных источников [2–4]. При этом токсичность этих элементов зависит от их степени окисления и вида соединения, так, например, соединения, содержащие Sb (III), намного более токсичны, чем соединения, которые содержат Sb (V). Для количественного определения различных форм или фаз, в которых данные элементы присутствуют в водной среде, применяют метод генерации гидридов [5].

В настоящее время генераторы гидридов в основном применяются совместно с атомно-абсорбционной спектроскопией и анализаторами ртути. При этом недостатками являются одноэлементность и трудоемкость анализа (для выполнения измерений выбранных металлов требуется смена источника возбуждения ионов).

Целью работы являлось (впервые в России) создание универсального аналитического комплекса на основе АЭС-ИСП и генератора гидридов (далее комплекса), а также разработка методики измерений (МИ) массовой концентрации токсичных металлов в пробах воды. Эксперимент проводился в химико-аналитическом центре «Арбитраж» ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» на многоканальной аналитической установке на базе атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой «ЭРИДАН-500/250В» [6]. При эксперименте использовались государственные стандартные образцы растворов металлов для градуирования спектрометра и пробы реальной воды.

Обоснование выбора метода АЭС-ИСП

В работе был выбран метод атомно-эмиссионной спектроскопии с термическими источниками возбуждения атомов, так как это – 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.

Метод основан на термическом возбуждении атомов (пламя, дуга, искра, плазменные источники) и регистрации оптического спектра испускания возбужденных атомов. Интенсивность излучения I зависит от значения массовой концентрации элемента в растворе анализируемой пробы и выражается формулой [7]:

$$I = BN_0 \exp(-E_m/kT),$$

где B – константа; N_0 – число невозбужденных атомов (пропорциональное их концентрации); E_m – энергия возбужденного уровня; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Каждый элемент имеет свой собственный характеристический ряд энергетических уровней и, таким образом, свой собственный уникальный ряд длин волн поглощения и эмиссии.

Основными критериями выбора являются:

- плазма как высокотемпературный источник возбуждения электронов, что позволяет порождать одновременно большое число энергетических уровней для всех выбранных элементов и совместно измерять эмиссию нескольких различных элементов;
- высокая чувствительность и, как следствие, небольшие количества пробы, необходимые для анализа содержания металлов;
- быстрота анализа (измерение одного образца занимает около двух минут, при этом в пробе анализируется одновременно от одного до сорока элементов).

Метод генерации гидридов

Несмотря на ряд преимуществ метода АЭС-ИСП, существует ряд трудностей при определении некоторых элементов, например, таких как мышьяк и сурьма. Так как мышьяк и сурьма – слабо возбуждаемые в плазме элементы, то энергии, необходимой для полного возбуждения As и Sb в жидкой пробе, недостаточно в связи с тем, что большая ее часть расходуется на нагрев и распад воды. Наблюдаются матричные эффекты от других элементов раствора, спектральные помехи, а также потери в распылительной камере.

Существует способ, который способен решить перечисленные проблемы. Это генерация гидридов – метод определения элементов, способных образовывать летучие газообразные гидриды – мышьяка, фосфора, сурьмы, селена, теллура, германия, олова. Гидриды образуются при восстановлении пробы боргидридом натрия (NaBH_4) в кислой среде (рис. 1), далее током инертного газа они отгоняются в кварцевую ячейку, установленную в оптическом пути спектрометра. Далее гидриды разлагаются при нагревании (либо с помощью пламени, либо с использованием электрического трубчатого нагревателя), образуют атомный пар, который и вызывает испускание света.

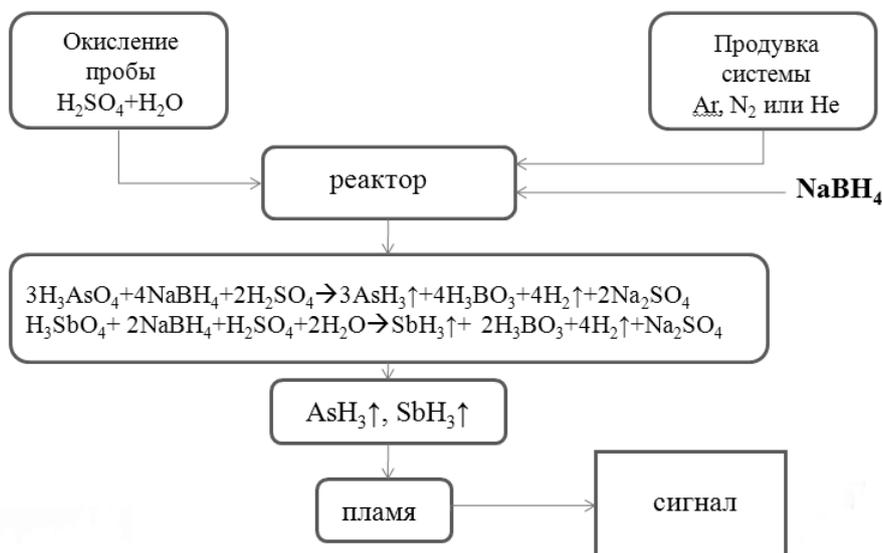


Рис. 1. Схема гидридной системы

Существующие методики измерений As и Sb в водных образцах

Из сравнения двух существующих методов измерения (МИ) (таблица) для определения As и Sb в водных растворах [8, 9] можно сделать вывод о том, что при использовании метода фотометрии предел обнаружения находится на границе предельно допустимых концентраций (ПДК) As и Sb (ПДК (As) – 0,05 мг/дм³, ПДК (Sb) – 0,05 мг/дм³), что недостаточно для качественного экологического мониторинга. Также наблюдается большая погрешность при определении низких концентраций исследуемых элементов как фотометрическим методом, так и методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией (ААС с ЭТ). Использование в разрабатываемой методике метода генерации гидридов позволит достичь большей точности при определении As и Sb на низких уровнях и повысить метрологические характеристики при определении низких концентраций (достигается относительная погрешность 10–15%, тогда как существующие методы определения обеспечивают относительную погрешность на уровне 40–50%).

| Параметры сравнения | Фотометрия | ААС с ЭТ |
|--|---|---|
| Методика | ПНД Ф 14.1:2.49-96 [8] | ПНД Ф 14.1:2.4.140-98 [9] |
| Разработчик | ФГУ «Федеральный научно-методический центр анализа и мониторинга окружающей среды МПР России – ФГУ «ФЦАМ» | Аналитический центр контроля качества воды ЗАО «РОСА» (г. Москва) |
| Диапазон измеряемых концентраций, мг/дм ³ | 0,05–0,8 | 0,0005–5 |
| Показатель точности ±δ, % | 41 (0,05–0,25 мг/дм ³) 28 (0,25–0,8 мг/дм ³) | 60 (0,0005–0,0025 мг/дм ³) 15 (0,05–0,3 мг/дм ³) 10 (0,3–5 мг/дм ³) |
| Показатель повторяемости σ _r , % | 12 (0,05–0,25 мг/дм ³) 8 (0,25–0,8 мг/дм ³) | 20 (0,0005–0,0025 мг/дм ³) 5 (0,05–0,3 мг/дм ³) 3 (0,3–5 мг/дм ³) |
| Показатель воспроизводимости σ _R , % | 16 (0,05–0,25 мг/дм ³) 11 (0,25–0,8 мг/дм ³) | 28 (0,0005–0,0025 мг/дм ³) 7 (0,05–0,3 мг/дм ³) 5 (0,3–5 мг/дм ³) |

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

Экспериментальная часть

При внедрении в практику совместного применения метода генерации гидридов и АЭС-ИСП был использован генератор гидридов HGX-200 фирмы СЕТАС.

На первом этапе работы с использованием государственных стандартных образцов (ГСО) растворов металлов были оценены режимы работы спектрометра напрямую и с подключением генератора гидридов. При анализе приготовленных растворов с различным содержанием As ($0,005 \text{ мг/дм}^3$; $0,01 \text{ мг/дм}^3$; $0,05 \text{ мг/дм}^3$; $0,1 \text{ мг/дм}^3$; $0,5 \text{ мг/дм}^3$; $1,0 \text{ мг/дм}^3$) при двух режимах работы спектрометра были получены градуировочные графики (рис. 2).

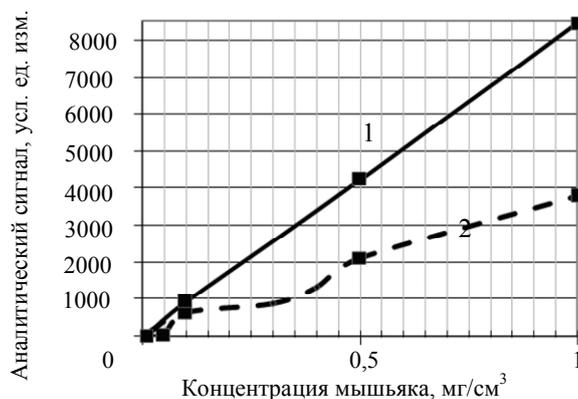


Рис. 2. Градуировочные графики двух режимов работы спектрометра: 1 – АЭС-ИСП без генератора гидридов; 2 – АЭС-ИСП с генератором гидридов

При концентрации в растворе As менее $0,5 \text{ мг/дм}^3$ его обнаружение без использования генератора гидридов невозможно. Спектры образцов, полученные без подключения генератора гидридов, представляют собой сплошную линию шумов (рис. 3), где выделить сигнал от As с учетом критерия 3σ -шум не представляется возможным.

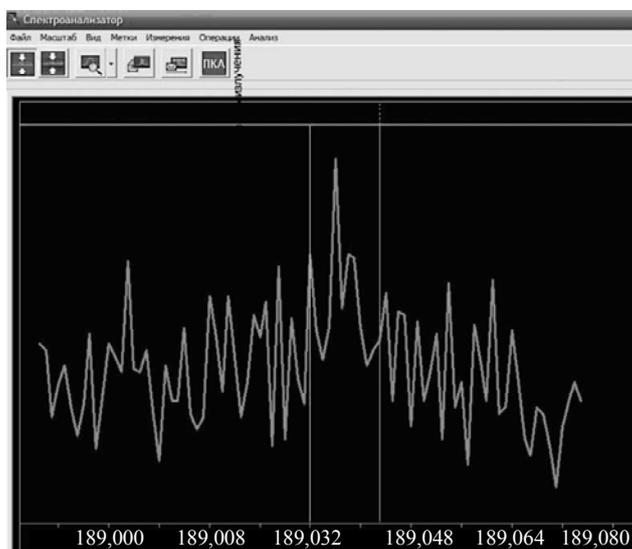


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения от длины волны (нм), полученная при прямом вводе

На втором этапе была оценена работа комплекса в зависимости от скорости подачи инертного газа-носителя (аргона-Ar) (рис. 4). Исследовались ГСО (№7143-95) с концентрацией мышьяка $0,1 \text{ мг/дм}^3$.

При увеличении скорости подачи газа (от $0,05 \text{ л/мин}$ до $0,1 \text{ л/мин}$) увеличивается количество ионов, прошедших в единицу времени через аналитическую зону плазмы. Наибольший сигнал получен при скорости подачи газа $0,1 \text{ л/мин}$ – $0,15 \text{ л/мин}$, это свидетельствует, что количество ионов, образовавшихся в единицу времени, равно количеству ионов, прошедших через плазму. Оптимальная скорость расхода газа составляет $0,15 \text{ л/мин}$, так как при меньшей скорости подачи реакции восстановления протекают нестабильно, а при большей реакция восстановления может пройти неполностью.

Для разработки МИ, уменьшения чувствительности и увеличения диапазона определения проводятся дальнейшие исследования по определению дозирования реагентов.

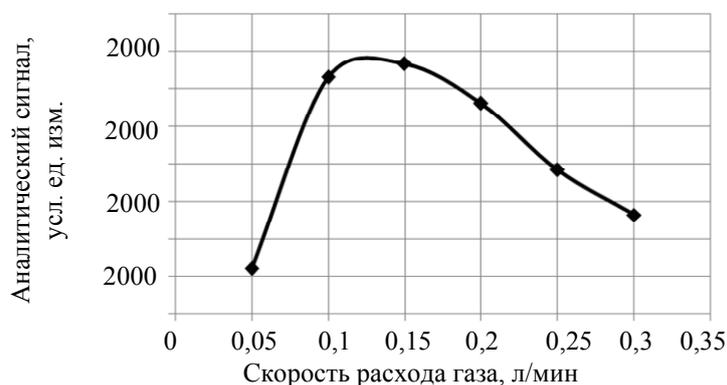


Рис. 4. Зависимость аналитического сигнала от скорости расхода газа-носителя

Заключение

В результате проведенных исследований по оценке основных характеристик работы универсального аналитического комплекса на основе АЭС-ИСП и генератора гидридов на примере мышьяка установлено, что использование техники получения гидридов позволяет существенно повысить чувствительность анализа и снизить предел обнаружения. В соответствии с полученной градуировочной характеристикой диапазон измерений составляет 0,003–1,0 мг/дм³, а предел обнаружения – 0,001 мг/дм³.

Показано, что на величину аналитического сигнала мышьяка оказывает заметное влияние скорость подачи газа-носителя. Так, для используемых в эксперименте параметров, при которых достигался максимальный сигнал аналита, оптимальная скорость составляла 0,15 л/мин.

Последующие исследования с использованием отработанного на примере мышьяка алгоритма для других гидридообразующих элементов индивидуально и при их совместном присутствии в пробе позволят снизить пороги обнаружения, увеличить чувствительность анализа элементов в несколько раз; снизить уровень мешающих влияний матрицы и т.д. и лечь в основу новых методик измерений наиболее опасных элементов в различных типах воды (водопроводной, природной, питьевой и т.п.).

Литература

1. Линник Р.П., Линник П.Н., Запорожец О.А. Методы исследования сосуществующих форм металлов в природных водах (Обзор) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nbu.gov.ua/portal/>, свободный. Яз. рус., укр. (дата обращения 25.01.2011).
2. Голубев Д.А., Сорокин Н.Д. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2007 году. – СПб: Сезам-Принт, 2008. – 472 с.
3. Перевозников М.А., Богданова Е.А. Тяжелые металлы в пресноводных экосистемах. – СПб: ГосНИОРХ, 1999. – 228 с.
4. Лазарев Н.В. Вредные вещества в промышленности. – Л.: Химия, Ленингр. отделение, 1977. – 608 с.
5. Niedzielski P., Sierak M. Determination of different forms of arsenic, antimony, and selenium in water samples using hydride generation // Polish Journal of Environment Studies. – 2006. – V. 11. – P. 219–224.
6. Спектрометр эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой «Эридан 500». Руководство по эксплуатации. – 2005. – 34 с.
7. Томпсон М., Уолш Д.Н. Руководство по спектрометрическому анализу с индуктивно-связанной плазмой. – М.: Недра, 1988. – 288 с.
8. ПНД Ф 14.1:2.49-96. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов мышьяка в природных и сточных водах фотометрическим методом с диэтилдитиокарбаматом серебра. – Введ. 26.03.1996. – М.: Минприроды РФ. – 17 с.
9. ПНД Ф 14.1:2.4.140-98. 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. – Введ. 25.06.1998. – М.: Государственный комитет РФ по охране окружающей среды. – 46 с.

Быковская Елена Александровна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, brownies@mail.ru

Максакова Ирина Борисовна

– ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», руководитель сектора, imax@b10.vniim.ru

УДК 681.5.01

СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.О. Никифоров, Г.В. Лукьянова

Представлен синтез системы слежения, обеспечивающей асимптотическое воспроизведение сигнала задания, генерируемого линейным командным генератором. Предлагаемое решение не требует измерения координат вектора состояния командного генератора и основано на использовании специального наблюдателя производных сигнала задания.

Ключевые слова: внутренняя модель, наблюдатель, следящая система, система комбинированного управления.

Введение

В подавляющем большинстве практических случаев построение высокоточных систем автоматического управления не может быть осуществлено без учета влияния внешних воздействий – сигналов задания и (или) внешних возмущений. Один из подходов к синтезу систем управления, работающих при внешних воздействиях, состоит в использовании принципа внутренней модели [1–6]. В соответствии с данным принципом, внешнее воздействие рассматривается в качестве выхода автономной динамической системы (командного генератора или генератора возмущения), а для асимптотического воспроизведения (или полной компенсации) внешнего воздействия модель генератора должна быть соответствующим образом воспроизведена в структуре замкнутой системы управления.

Принцип внутренней модели является хорошо разработанным для задач асимптотического слежения и предполагает построение систем комбинированного управления, содержащих в своей структуре обратные связи по ошибке слежения и прямые связи по сигналу задания [4–8]. Однако большинство представленных в литературе решений ориентировано на использование методов пространства состояний, что, в частности, требует измерения координат векторов состояния объекта управления и командного генератора.

В работе предложен метод синтеза, позволяющий избежать необходимости измерения координат векторов состояния и предполагающий использование специальных наблюдателей старших производных сигнала задания.

Постановка задачи

Рассматривается линейный объект управления

$$y = k \frac{\beta(p)}{\alpha(p)} u, \quad (1)$$

где $y = y(t)$ – регулируемая переменная; $u = u(t)$ – сигнал управления; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; $\alpha(p) = p^n + \alpha_{n-1}p^{n-1} + \alpha_{n-2}p^{n-2} + \dots + \alpha_0$ и $\beta(p) = p^m + \beta_{m-1}p^{m-1} + \beta_{m-2}p^{m-2} + \dots + \beta_0$ – нормированные полиномы с известными постоянными коэффициентами α_i и β_j ; k – «высокочастотный» коэффициент усиления. Дополнительно полагается, что полином $\beta(p)$ является гурвицевым и $n \geq m$.

Будем считать, что сигнал задания $g = g(t)$ представим в виде выхода линейной модели (командного генератора) конечной размерности:

$$\dot{x} = \Gamma x, \quad (2)$$

$$g = c^T x. \quad (3)$$

В модели (2)–(3) x – q -мерный вектор состояния командного генератора с начальным значением $x(0)$; Γ – известная $q \times q$ матрица постоянных коэффициентов; c – вектор постоянных коэффициентов соответствующей размерности. Без потери общности будем считать, что пара (c^T, Γ) является полностью наблюдаемой. Будем также полагать, что модель (2)–(3) является виртуальной, вектор состояния командного генератора x прямым измерениям недоступен, а измеряется зашумленный сигнал задания вида

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

где $\delta = \delta(t)$ – шум измерений (заранее не известная функция времени).

Рассматриваемая задача состоит в обеспечении условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (g(t) - y(t)) = 0 \text{ при } \delta(t) \equiv 0, \quad (5)$$

или в обеспечении малой ошибки слежения $e = g - y$ в случае малой нерегулярной составляющей δ .

Замечание 1. Здесь малость сигнала (т.е. малость функции времени) понимается в смысле какой-либо нормы амплитуды данного сигнала.

Вспомогательные результаты

Для синтеза наблюдателя производных сигнала задания используем следующий результат.

Лемма 1 [9, 10]. *Сигнал задания g может быть представлен в виде выхода модели*

$$\dot{\xi} = G\xi + l g, \tag{6}$$

$$g = \theta^T \xi, \tag{7}$$

где G – произвольная $q \times q$ гурвицева матрица постоянных коэффициентов, образующая с $q \times 1$ вектором постоянных коэффициентов l полностью управляемую пару; $\theta^T = c^T P^{-1}$ – $1 \times q$ вектор постоянных коэффициентов; вектор состояния ξ связан с вектором состояния x командного генератора (3)–(4) соотношением подобия

$$\xi = P x, \tag{8}$$

а $q \times q$ матрица P является решением матричного уравнения

$$P\Gamma - GP = l c^T. \tag{9}$$

Тогда легко показать, что i -ая производная сигнала g может быть представлена в виде [10]

$$g^{(i)} = \theta^T (G + l\theta^T)^i \xi, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Замечание 2. В силу гурвицевости матрицы G начальные условия модели (6) могут быть выбраны произвольными. Однако если $x(0)$ и $\xi(0)$ не согласованы (например, если $\xi(0) = 0$), то выражения (7) и (8) будут содержать дополнительное экспоненциально затухающее слагаемое, которым в дальнейшем рассмотрении будем пренебрегать.

При построении замкнутой системы автоматического управления будем использовать следующий результат.

Лемма 2 [11–13]. *Пусть заданы произвольные нормированные полиномы*

$$A(p) = p^M + a_{M-1}p^{M-1} + a_{M-2}p^{M-2} \dots + a_0,$$

$$B(p) = p^N + b_{N-1}p^{N-1} + b_{N-2}p^{N-2} \dots + b_0,$$

где $M > N$. Тогда существуют единственные полиномы

$$R(p) = r_{N-1}p^{N-1} + r_{N-2}p^{N-2} + \dots + r_0,$$

$$D(p) = p^{M-N} + d_{M-N-1}p^{M-N-2} + \dots + d_0,$$

удовлетворяющие уравнению

$$A(p) = B(p)D(p) + R(p).$$

Основной результат

Сформируем управление в виде

$$u = \frac{1}{k} \frac{d(p)}{D(p)\beta(p)} \left(\bar{g} - \frac{R(p)}{d(p)} y \right), \tag{10}$$

где $d(p)$ – произвольный нормированный гурвицев полином степени $n-1$, нормированный полином $D(p)$ степени $n-m-1$ и полином $R(p)$ степени $n-1$ являются решениями уравнения

$$d(p)\bar{\alpha}(p) = \alpha(p)D(p) + R(p) \tag{11}$$

с произвольным гурвицевым полиномом $\bar{\alpha}(p) = p^{n-m} + \bar{\alpha}_{n-m-1}p^{n-m-1} + \bar{\alpha}_{n-m-2}p^{n-m-2} + \dots + \alpha_0$. При этом сигнал $\bar{g} = \bar{g}(t)$ формируется по правилу

$$\bar{g} = \bar{g}_{n-m} + \bar{\alpha}_{n-m-1}\bar{g}_{n-m-1} + \bar{\alpha}_{n-m-2}\bar{g}_{n-m-2} + \dots + \bar{\alpha}_0 g, \tag{12}$$

где для формирования оценок \bar{g}_i i -ых производных сигнала задания g используется специальный наблюдатель, состоящий из вспомогательного фильтра

$$\dot{\xi} = G\xi + l \gamma \tag{13}$$

и блока расчета производных

$$\bar{g}_i = \theta^T (G + l\theta^T)^i \xi, \quad i = 1, 2, \dots, n-m. \tag{14}$$

Размерность, свойства и правила выбора (расчета) матрицы G и векторов l и θ определены в лемме 1.

Утверждение. Управление, формируемое в соответствии с выражениями (10), (12)–(14), обеспечивает для объекта управления (1) выполнение целевого условия (5), а также малую ошибку слежения $e = g - y$ в случае малости нерегулярной составляющей δ .

Доказательство. С учетом подстановок $A(p) = d(p)\bar{\alpha}(p)$, $B(p) = \beta(p)$, $N = n$ и $M = 2n - 1$ из леммы 2 следует существование полиномов $D(p)$ и $R(p)$, удовлетворяющих уравнению (11). Подставляя далее управление (10) в (1), после элементарных преобразований (при этом происходит сокращение полиномов $\beta(p)$ и $d(p)$) получаем уравнение замкнутой системы:

$$y = \frac{1}{\bar{\alpha}(p)} \bar{g}. \quad (15)$$

При $\delta(t) \equiv 0$ из леммы 1 следует, что уравнения (13) и (15) определяют старшие производные сигнала задания и, таким образом (см. (12)), $\bar{g} = \bar{\alpha}(p)g$. Подставляя последнее равенство в (14), получаем $y = g$, т.е. выполнение целевого условия (5). На самом деле имеет место не абсолютное равенство, а асимптотическое стремление y к g , так как мы пренебрегли экспоненциально затухающим слагаемым, вызванным несогласованностью начальных условий командного генератора и наблюдателя производных (см. замечание (2)). Так как для формирования оценок производных сигнала задания используется асимптотически устойчивый динамический фильтр (13) и операции умножения на постоянные коэффициенты (14), то можно показать, что присутствие в сигнале измерений γ малой (в смысле амплитудной нормы) шумовой составляющей $\delta(t)$ приведет к малым ошибкам слежения (в отличие от попыток использования на практике операции дифференцирования, когда малый по амплитуде высокочастотный шум может привести к неограниченно большим ошибкам).

Обсудим предложенный алгоритм управления. Как было отмечено выше, в замкнутой системе управления происходит сокращение двух полиномов $-\beta(p)$ и $d(p)$. По этой причине они должны быть гурвицевыми. Полином $d(p)$ назначается разработчиком и может быть интерпретирован как характеристический полином наблюдателя вектора состояния объекта управления. Полином $\beta(p)$ является числителем передаточной функции объекта управления, и его гурвицевость означает требование минимальной фазовости объекта управления. Как видно из выражения (15), полином $\bar{\alpha}(p)$ определяет динамику замкнутой системы и поэтому может быть интерпретирован как желаемый характеристический полином замкнутой системы. Известно, что минимальный динамический порядок замкнутой системы может быть обеспечен равным относительной степени исходного объекта управления, т.е. равным $n - m$.

Предложенный алгоритм управления (10) является комбинированным, так как содержит обратную связь по регулируемой переменной y , а также прямую связь \bar{g} по сигналу задания, для формирования которой используется наблюдатель производных сигнала задания (13), (14).

Пример

Рассмотрим неустойчивый объект управления

$$y = 3 \frac{p+2}{p^3 + 2p^2 - p + 1} u.$$

Пусть цель управления состоит в асимптотическом слежении за сигналом задания $g(t) = 5 \sin(2t + 0,41)$, который можно представить в качестве выхода командного генератора вида

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad g = x_1, \quad x_1(0) = 2, \quad x_2(0) = 9,17.$$

Выберем $\bar{\alpha}(p) = p^2 + 5p + 6$, $d(p) = p^2 + 3p + 2$. Тогда, решая уравнение (11), находим $D(p) = p + 6$ и $R(p) = 12p^2 + 33p + 6$. Пусть

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -5 \end{bmatrix}, \quad l = \begin{bmatrix} 0 \\ 6 \end{bmatrix}.$$

Решая уравнение (9), находим

$$P = \begin{bmatrix} 0,115 & -0,288 \\ 1,153 & 0,115 \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad \theta^T = [0,334 \quad 0,834].$$

Тогда наблюдатель первой и второй производной сигнала задания будет описываться выражениями

$$\dot{\xi}_1 = \xi_2, \quad \dot{\xi}_2 = -6\xi_1 - 5\xi_2 + 6\gamma, \quad \bar{g}_1 = -3,33\xi_1 + 0,33\xi_2, \quad \bar{g}_2 = -1,33\xi_1 + -3,33\xi_2,$$

где $\gamma = g + \delta$ является зашумленным сигналом задания, а δ – белый шум определенной интенсивности.

Выберем $\xi_1(0) = 0, \xi_2(0) = 0$.

Окончательно искомое управление принимает вид

$$u = \frac{1}{3} \frac{p^2 + 3p + 2}{p^2 + 8p + 12} \left(\bar{g} - \frac{12p^2 + 33p + 6}{p^2 + 3p + 2} y \right),$$

где сигнал \bar{g} формируется по правилу

$$\bar{g} = \bar{g}_2 + 5\bar{g}_1 + 6\gamma.$$

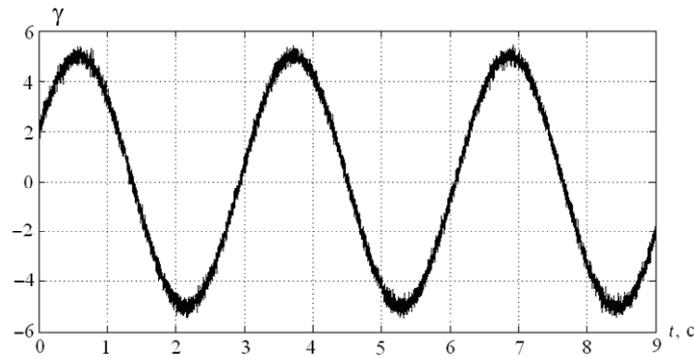


Рис. 1. Зашумленный сигнал задания, доступный измерениям $\bar{g}_1, \dot{\bar{g}}$

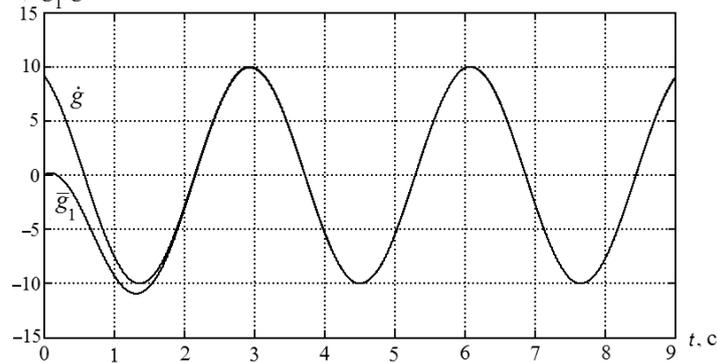


Рис. 2. Оценка первой производной (\dot{g} – первая производная сигнала задания, \bar{g}_1 – оценка первой производной сигнала задания g)

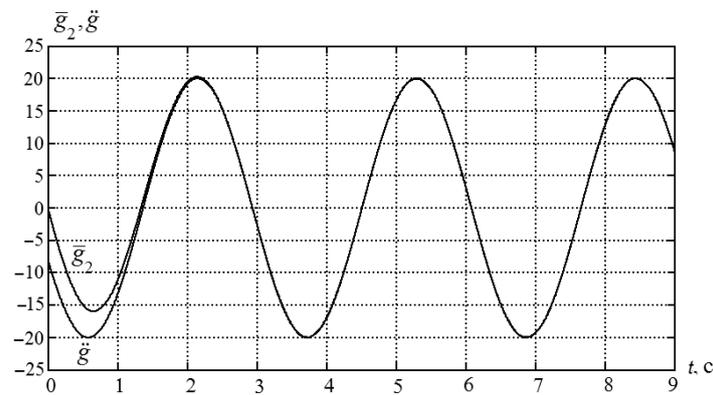


Рис. 3. Оценка второй производной (\ddot{g} – вторая производная сигнала задания, \bar{g}_2 – оценка второй производной сигнала задания g)

Результаты моделирования переходных процессов в замкнутой системе приведены на рис. 1–4. На рис. 1 представлен зашумленный сигнал задания $\gamma = g + \delta$. На рис. 2, 3 представлены первая и вторая производные сигнала задания и их оценки. Как видно из рис. 2, 3, несмотря на существенную зашумлен-

ность сигнала задания, представленный наблюдатель обеспечивает точное восстановление его производных. На рис. 4 приведена ошибка слежения, демонстрирующая выполнение цели управления, т.е. высокую точность слежения за командным сигналом $g(t)$.

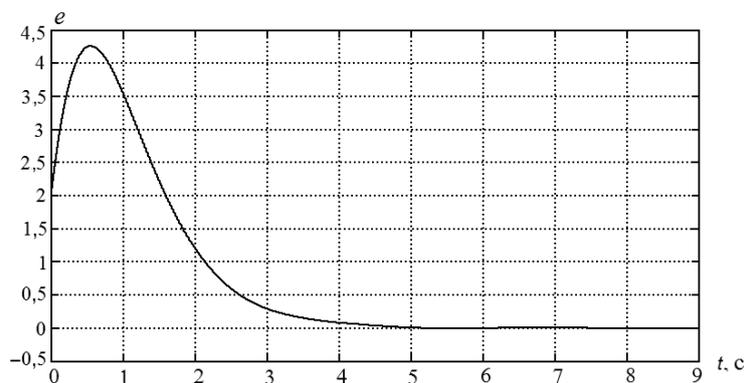


Рис. 4. Ошибка слежения

Заключение

Представленная процедура синтеза позволяет построить для объекта «вход–выход» комбинированную систему слежения за командным генератором сигнала задания. Для построения управления не требуется измерения координат вектора состояния объекта или командного генератора. Предложенное решение основано на использовании специального наблюдателя производных сигнала задания. Как показано в работе и проиллюстрировано результатами моделирования, даже существенная зашумленность сигнала задания не приводит к потере работоспособности предложенной системы.

Литература

1. Johnson C.D. Accommodation of external disturbances in linear regulator and servomechanism problems // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1971. – V. 16. – № 6. – P. 635–644.
2. Francis B.A. and W.M. Wonham The internal model principle for linear multivariable regulators // Appl. Mathematics and Optimization. – 1975. – № 2. – P. 170–194.
3. Davison E.J. The robust control of a servomechanism problem for linear time-invariant multivariable systems // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1976. – V. 21. – № 1. – P. 25–34.
4. Уонем М. Линейные многомерные системы управления: Геометрический подход. – М.: Наука, 1980. – 376 с.
5. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ / В.В. Григорьев, В.Н. Дроздов, В.В. Лаврентьев, А.В. Ушаков. – Л.: Машиностроение, 1983. – 245 с.
6. Дроздов В.Н., Мирошник И.В., Скорубский И.В. Системы автоматического управления с микроЭВМ. – Л.: Машиностроение, 1989. – 284 с.
7. Акунов Т.А., Алишеров С., Оморов Р.О., Ушаков А.В. Матричные уравнения в задачах управления и наблюдения непрерывных объектов. – Бишкек: Илим, 1991. – 61 с.
8. Мирошник И.В., Никифоров В.О. Синтез линейных систем автоматического управления. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2000. – 54 с.
9. Nikiforov V.O. Adaptive non-linear tracking with complete compensation of unknown disturbances // European Journal of Control. – 1998. – V. 4. – № 2. – P. 132–139.
10. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. – СПб: Наука, 2003. – 282 с.
11. Острем К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ. – М.: Мир, 1987. – 480 с.
12. Лукьянова Г.В., Никифоров В.О. Алгоритм компенсации внешних детерминированных возмущений: операторный метод синтеза // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2003. – № 10. – С. 5–10.
13. Бобцов А.А., Лукьянова Г.В., Никифоров В.О. Алгоритм компенсации внешнего гармонического возмущения неизвестной частоты для систем активной виброзащиты // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 11. – С. 39–43.

Никифоров Владимир Олегович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, проректор, nikiiforov@mail.ifmo.ru

Лукьянова Галина Владимировна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, зав. аспирантурой, gal-lou@yandex.ru

УДК 538.566

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ ПРИЗЕМНЫМИ АНТЕННАМИ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

С.Т. Рыбачек, М.А. Белянский

Настоящая работа является продолжением статьи [1] и содержит результаты численных расчетов, а также анализ напряженностей электрического и магнитного полей в нижней области ионосферы. Исследуется влияние на структуру полей высоты расположения приемника, условий распространения, расстояния между корреспондирующими пунктами и частоты.

Ключевые слова: электромагнитные поля, анизотропная ионосфера, низкочастотные антенны.

Используемые модели и параметры задачи

Расчеты были выполнены в диапазоне частот $f=0,5-15$ кГц для высот расположения приемника в ионосфере $H = 50-500$ км и ряда трасс, отличающихся протяженностью вдоль поверхности Земли $R = a\theta$, удельной проводимостью подстилающей поверхности σ , а также параметрами ионосферы. Компоненты геомагнитного поля задавались равными $H_{0\theta} = 0,148$ Э, $H_{0\varphi} = 0$, $H_{0r} = -0,473$ Э. Для описания свойств ионосферы были использованы летние модели электронной концентрации N [2] для дневных ($t = 13$ ч) и ночных ($t = 1$ ч) условий распространения, а также модели эффективных частот соударений ν_e из работ [3] на высотах до 120 км и [4] – от 120 до 500 км. Результаты приводятся в виде модулей компонент напряженностей электрического и магнитного полей E_ξ и \mathcal{H}_ξ (в мкВ/м), создаваемых наземными диполями – вертикальным (радиальным) относительно границ раздела электрическим диполем (ВЭД) и ориентированным по орту e_θ магнитным диполем (ГМД) с токовыми моментами 10^6 А·м² и 10^{10} А·м² соответственно ($\xi = r, \theta, \varphi$). Поля диполей других типов и ориентаций, как было показано в [1], отличаются постоянными множителями от соответствующих полей вертикального электрического и горизонтального магнитного диполей.

Результаты расчетов и их интерпретация

Результаты расчетов, приведенные на рис. 1–3, выполнены для частоты 10 кГц и трассы, характеризующейся протяженностью 3300 км и проводимостью 10^{-1} См/м.

На рис. 1 представлены зависимости модулей компонент E_ξ и \mathcal{H}_ξ вертикального электрического диполя от высоты H расположения точки наблюдения в нижней области дневной ионосферы. Отметим прежде всего, что зависимости модулей компонент $E_\varphi(H)$ (рис. 1, а) и $\mathcal{H}_r(H)$ (рис. 1, б), как и следовало ожидать, качественно совпадают, поскольку из уравнений Максвелла для ионосферы вытекает, что для излучателя любого типа на всех рассматриваемых высотах справедливы выражения для компонент полей отдельной нормальной волны

$$\mathcal{H}_{rs} = \nu_s E_{\varphi s} / (kr), \tag{1}$$

где s – номер нормальной волны. В сверхнизкочастотном диапазоне, где справедливо одномодовое представление поля, для $s = 1$ соотношение (1) описывает полное поле и является строгим. В диапазоне сверхдлинных волн для полного поля в рассматриваемой ситуации, полагая $r \approx a$ и учитывая, что $\nu_s \approx ka$, можно написать приближенное выражение

$$\mathcal{H}_r \approx E_\varphi. \tag{2}$$

Расчеты по алгоритмам, описанным в [1], показали, что относительное отличие приводимых ниже значений $|E_\varphi|$ и $|\mathcal{H}_r|$ не превышает двух процентов. Из уравнений Максвелла также следует, что на малых высотах, где свойства ионосферы близки к свойствам свободного пространства, для полного поля можно написать аналогичное (2) приближенное равенство

$$E_r \approx -\mathcal{H}_\varphi, \tag{3}$$

которое в рассматриваемом примере приводит к качественному совпадению модулей E_r и \mathcal{H}_φ на высотах от 50 до 65 км.

Из графиков на рис. 1 также вытекает, что при расположении диполя на высотах $\sim 50-70$ км компоненты первичной поляризации $E_r, E_\theta, \mathcal{H}_\varphi$ по модулю превышают значения компонент вторичной поляризации $\mathcal{H}_r, \mathcal{H}_\theta, E_\varphi$, появление которых вызвано деполяризующим действием геомагнитного поля.

Это превышение обусловлено близостью свойств ионосферы к свойствам свободного пространства на указанных высотах.

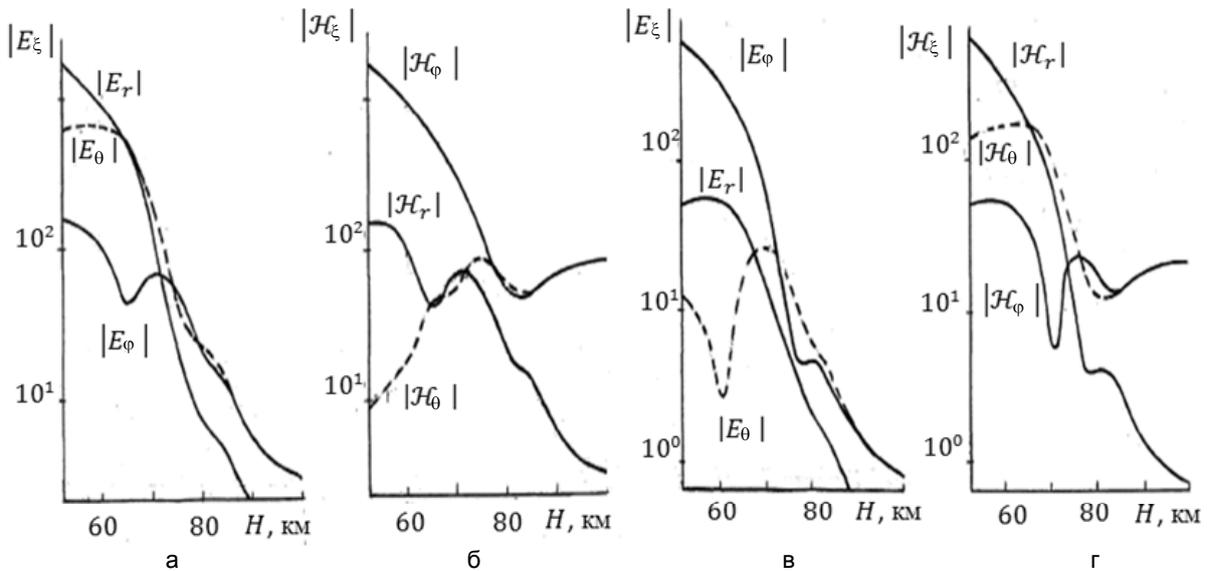


Рис. 1. Высотные зависимости $|E_\xi|$ (а, в) и $|H_\xi|$ (б, г) в интервале $H = 52 - 100$ км:

а, б – ВЭД, 10 кГц, день; в, г – ГМД, 10 кГц, день

В окрестности $H \approx 75$ км модули касательных компонент электрического поля (рис. 1, а), как и модули касательных компонент магнитного поля (рис. 1, б), начинают сближаться. С увеличением высоты эти компоненты совпадают, а зависимости $|E_r(H)|$ и $|E_{\theta,\phi}(H)|$ отличаются постоянным множителем. Этим особенностям поведения полей можно дать достаточно удовлетворительную интерпретацию, если предположить, что в области высот $H > 75$ км поле описывается одной собственной ионосферной волной [1]. Поля такой волны подчиняются уравнению, по форме совпадающему с уравнением, описывающим распространение плоских волн в однородной магнитоактивной среде. Это позволяет ожидать, что на больших удалениях от приземного излучателя, создающего сферическую волну, свойства ионосферных полей в нашей задаче и задаче распространения плоских волн будут близки.

Действительно, в области применимости квазипродольной аппроксимации [5], определяемой неравенством $|Y_T^2| \ll |2Y_L(U - X)|$, связь между компонентами полей плоских волн в принятых в магнитоионной теории обозначениях имеет следующий вид:

$$\frac{E_\phi}{E_\theta} = -\frac{H_\theta}{H_\phi} = \pm i, \quad \frac{E_r}{E_\theta} = \pm \frac{Y_T X}{(U \pm Y_L)(U - X)}, \quad \frac{H_\phi}{E_\theta} = n, \quad (4)$$

$$n^2 = 1 - \frac{X}{U \pm Y_L}, \quad X = \frac{e^2 N}{m \epsilon_0 \omega^2}, \quad U = 1 + i \frac{\nu_e}{\omega}.$$

Здесь e , m – заряд и масса электрона соответственно; n – индексы рефракции собственных ионосферных волн; Y_L и Y_T – продольная (радиальная) и поперечная составляющие вектора \mathbf{Y} , направленного противоположно вектору геомагнитного поля \mathbf{H}_0 . Так как в северном полушарии для распространяющейся вверх собственной волны компонента $H_{0L} = H_{0r}$ отрицательна, то Y_L является положительное числом,

$$Y_L = \frac{\mu_0}{m\omega} |eH_{0L}|.$$

В рассматриваемом диапазоне частот в области высот $H \approx 90 - 500$ км днем и $\approx 190 - 500$ км ночью свойства ионосферы таковы, что имеют место неравенства $|U| \ll |Y_L| \ll X$, которые приводят к следующим отношениям компонент полей:

$$E_\theta/E_r = -Y_L/Y_T = -H_{0L}/H_{0T}, \quad H_\phi/E_\theta = n, \quad n^2 = \mp X/Y_L. \quad (5)$$

Как известно [5], в задаче распространения плоских волн в однородной анизотропной среде продольная компонента магнитного поля равна нулю. В рассматриваемой авторами задаче распространения сферических волн, создаваемых приземными диполями в ионосфере, соответствующая радиальная ком-

понента магнитного поля отлична от нуля. Найдем поэтому, используя (2), (4) и (5), отношения компонент магнитных полей, соответствующие сверхдлинноволновому и сверхнизкочастотному диапазонам

$$\mathcal{H}_\theta/\mathcal{H}_r = -n, \quad \mathcal{H}_\theta/\mathcal{H}_r = -krn/v. \quad (6)$$

Из формулы для n^2 в (5) следует, что значения индексов рефракции n могут быть либо вещественными, либо мнимыми. Вследствие этого, как уже отмечалось в работе [1], из двух распространяющихся вверх собственных волн существенно распространяющийся характер имеет лишь волна с вещественным (и положительным для нашей зависимости от времени) индексом рефракции, равным

$$|n| = \sqrt{X/Y_L} = c\sqrt{|e|N/(\omega|H_{0r}|)}, \quad |\mathcal{H}_\theta/\mathcal{H}_r| \approx 5,37\sqrt{N/(f|H_{0r}|)}. \quad (7)$$

где c – скорость света в свободном пространстве. В формуле (7), удобной для расчетов, электронная концентрация задается количеством электронов в кубическом сантиметре, а продольная составляющая геомагнитного поля H_{0r} – в эрстедах.

Возвращаясь к рис. 1, отметим, что, как показывают расчеты, при $H = 87$ км относительное отличие касательных компонент равно $\approx 5\%$. На высотах $H \geq H_1 = 87$ км это отличие с увеличением высоты уменьшается, а модуль отношения касательной и радиальной составляющих равен примерно 3,2 и совпадает в соответствии с выражением (5) с модулем отношения продольной и поперечной составляющих геомагнитного поля. Однако отношение $|\mathcal{H}_{\theta,\phi}/\mathcal{H}_r|$ в этой области не остается постоянным и определяется, как следует из отношений (6), модулем индекса рефракции (7).

На рис. 2 приводятся зависимости $|E_\xi(H)|$ (а) и $|\mathcal{H}_\xi(H)|$ (б) ГМД, для которого в отличие от ВЭД первичными компонентами являются E_ϕ, \mathcal{H}_r и \mathcal{H}_θ . При этом для ГМД, как и для ВЭД, в рассматриваемом диапазоне высот выполняется соотношение (2), а в начале ионосферы на высотах от 50 до ≈ 70 км – соотношение (3). На фиксированной высоте, большей $H_1 = 87$ км, модуль каждой компоненты поля ГМД отличается постоянным множителем от аналогичной компоненты полей ВЭД.

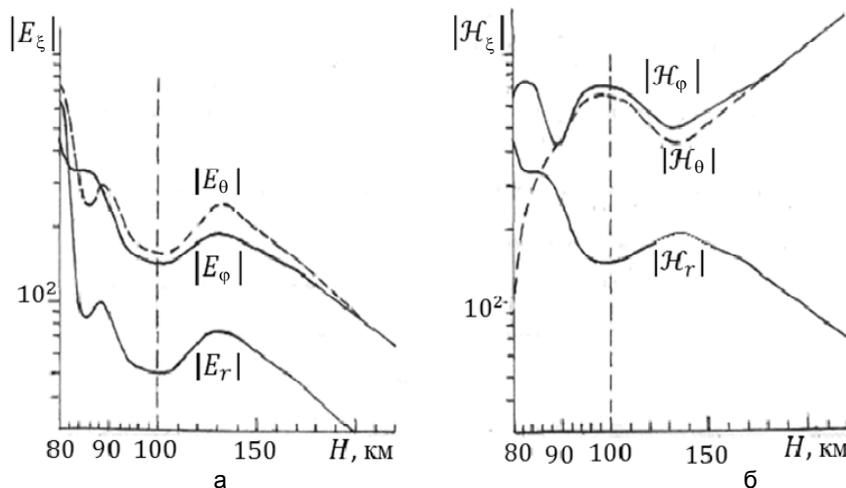


Рис. 3. Высотные зависимости $|E_\xi|$ (а) и $|\mathcal{H}_\xi|$ (б) в интервале $H=80-220$ км (ВЭД, 10 кГц, ночь)

В качестве иллюстрации поведения полей в ночное время на рис. 3 приведены зависимости $|E_\xi(H)|$ (а) и $|\mathcal{H}_\xi(H)|$ (б) ВЭД. (В областях 80–100 км и 100–220 км, которые разделены вертикальной штриховой линией, масштаб по оси абсцисс разный). В начале ионосферного слоя, как и в дневное время, модули компонент полей ведут себя в соответствии с поляризацией падающей на ионосферу волны. В отличие от дня, ночью область сближения модулей касательных компонент полей обладает большей по сравнению с дневной протяженностью – их относительное отличие достигает величины, не превышающей 5%, лишь на высотах $H \geq H_1 = 185$ км.

На рис. 4–6 приводятся модули компонент полей E_θ и \mathcal{H}_ϕ . Напомним, что на высотах H , больших 87 км днем и 185 км ночью, компонента E_θ описывает одновременно компоненту E_ϕ , а компонента \mathcal{H}_ϕ описывает составляющую \mathcal{H}_θ .

Высотные зависимости модулей касательных составляющих полей $E_\theta(H)$ и $\mathcal{H}_\phi(H)$ радиального электрического диполя для частоты 10 кГц и разных удалений $R = a\theta$ приводятся на рис. 4, а, и рис. 4, б,

соответственно. В областях 80–100 км и 100–500 км (они разделены вертикальной штриховой линией) масштаб по оси абсцисс разный. Непрерывными линиями изображены ночные зависимости, штриховыми – дневные. Дневные зависимости модулей обеих компонент на высотах $H > 100$ км, в отличие от области 80–100 км, слабо зависят от H . Ночные зависимости на высоте $H \approx 120$ км имеют экстремумы, обусловленные максимумом профиля электронной концентрации $N(H)$ на этой высоте. Увеличение удаления R на заданной высоте при $H > 100$ км приводит, как правило, к уменьшению амплитуд полей. При этом увеличение R от 1 до 2 Мм дает в рассматриваемом случае уменьшение амплитуд полей приблизительно в 1,7 раз в дневной и в 3,5 раза в ночной ионосфере.

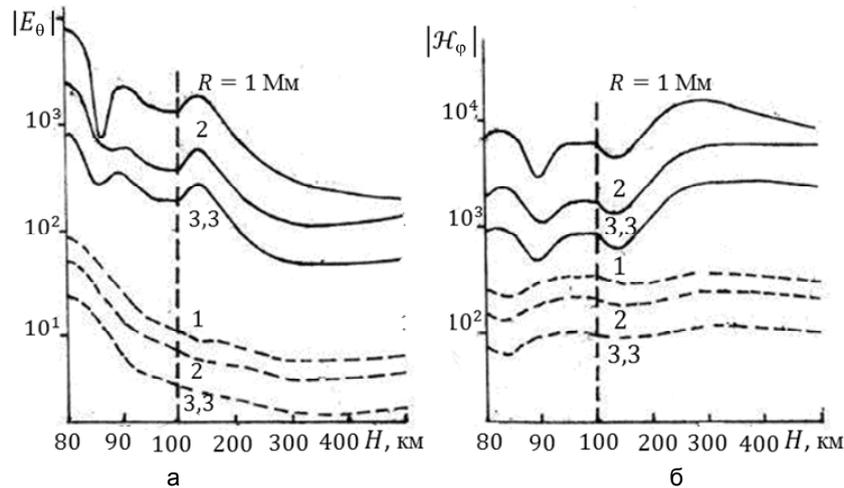


Рис. 4. Высотные зависимости $|E_0|$ (а) и $|H_\phi|$ (б) для удалений $R = 1; 2$ и $3,3$ Мм в интервале $H = 80\text{--}500$ км. Непрерывные линии – ночь, штриховые – день (ВЭД, 10 кГц)

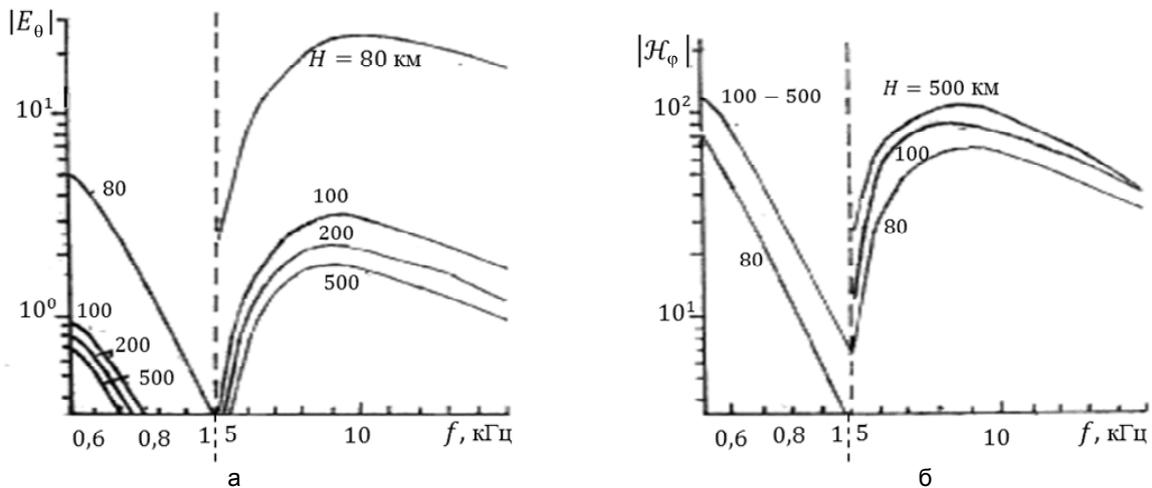


Рис. 5. Частотные зависимости $|E_0|$ (а) и $|H_\phi|$ (б) для высот $H = 80, 100, 200, 500$ км в диапазонах частот $f = 0,5\text{--}1$ кГц и $5\text{--}15$ кГц (ВЭД, день)

Частотные зависимости модулей касательных компонент $E_\theta(f)$ и $H_\phi(f)$ радиального электрического диполя для трассы протяженностью 3300 км изображены на рис. 5 для дневной и на рис. 6 для ночной ионосферы. Зависимости приводятся в диапазонах частот 0,5–1 кГц и 5–15 кГц (они разделены вертикальной штриховой линией), масштаб по оси абсцисс в этих диапазонах разный. В области частот 1–5 кГц результаты расчетов в которой не приводятся, зависимости $|E_\theta(f)|$ и $|H_\phi(f)|$ могут меняться на несколько порядков, что обусловлено наличием так называемых волноводных минимумов. Дневные зависимости $|E_\theta(f)|$ на всех рассматриваемых высотах имеют максимум в окрестности $f \approx 10$ кГц, а зависимости $|H_\phi(f)|$ – в окрестности $f \approx 9$ кГц. В ночных условиях (рис. 6) на частотах, больших примерно 9 кГц, зависимости $|E_\theta(f)|$ и $|H_\phi(f)|$ начинают осциллировать вследствие включения последующих нормальных волн. На частоте, примерно равной 12 кГц, наблюдается минимум, обусловленный сменой ведущих мод.

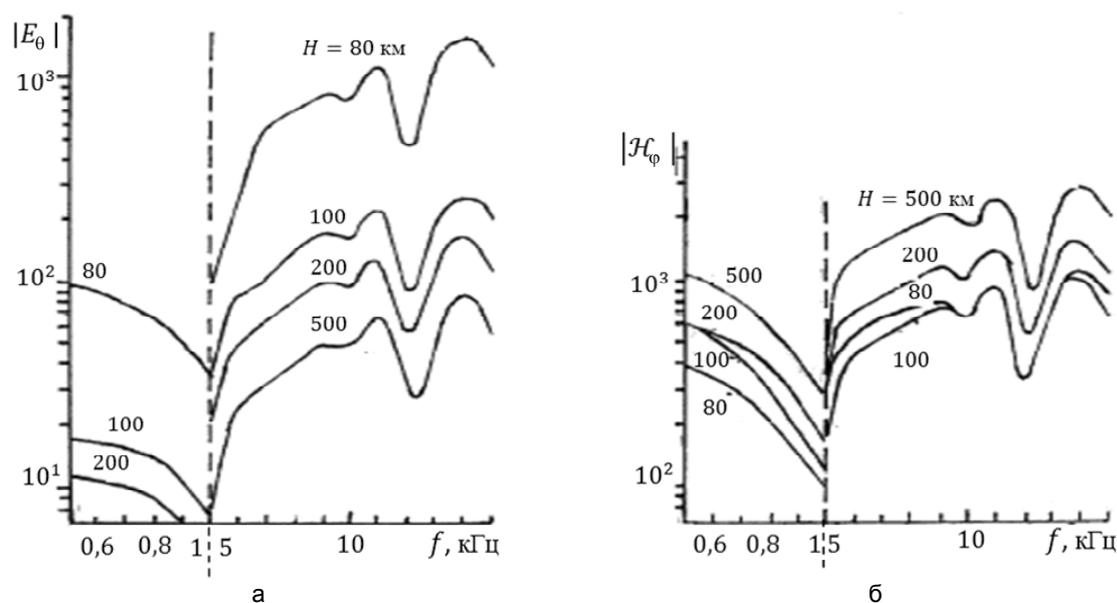


Рис. 6. Частотные зависимости $|E_0|$ (а) и $|H_\phi|$ (б) для высот $H = 80, 100, 200, 500$ км в диапазонах частот $f = 0,5-1$ кГц; $5-15$ кГц (ВЭД, ночь)

Заключение

Результаты численных расчетов дают представление о структуре электромагнитных полей в ионосфере и позволяют оценить параметры наземных антенн, эффективно возбуждающих ионосферные поля.

Одной из существенных особенностей структуры полей является то, что в области высот $H > H_1$ модуль отношения касательной и радиальной компонент магнитного поля определяется выражением (7). Расчеты показывают, что в значительной области частот и широт отношение $|H_\theta| / |H_r| \gg 1$. Так, на частоте 0,5 кГц это отношение на широтах от 80 до 10 градусов и высотах 250–300 км, соответствующих максимуму электронной концентрации, может достигать 100–300.

Это обстоятельство выходит за рамки рассматриваемой задачи и дает возможность оценить эффективность возбуждения приземного волновода горизонтальными электрическими и магнитными диполями по сравнению с соответствующими вертикальными. Что касается магнитных диполей, для которых такая эффективность заметно превышает значения, соответствующие электрическим диполям, из обобщенной теоремы взаимности следует, что отношение модулей радиальных компонент электрического поля, создаваемого на поверхности Земли горизонтальным и вертикальным магнитными диполями (hm, vm), расположенными в ионосфере, определяется такой же правой частью, что и в (7):

$$|E_r^{hm}| / |E_r^{vm}| \approx 5,37 \sqrt{N/(f |H_{0r}|)}$$

С учетом приведенных выше расчетов можно сделать вывод, что, по крайней мере, при расположении диполя на высотах 250–300 км на частоте 0,5 кГц горизонтально ориентированный магнитный диполь излучает намного более эффективно, чем вертикально ориентированный магнитный диполь.

Литература

1. Рыбачек С.Т., Белянский М.А. Основные особенности структуры электромагнитных полей, создаваемых в нижней ионосфере низкочастотными приземными антеннами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5 (75). – С. 48–53.
2. Rawer K., Bilitza D., Ramakrishnan S. Goals and status of the International Reference Ionosphere // Rev. Geophys. Space Phys. – 1978. – V. 16. – P. 177–181.
3. COSPAR International Reference Atmosphere. – Berlin, 1972. – 450 p.
4. Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К. и др. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. – М.: Наука, 1981. – 256 с.
5. Budden K.G. Radiowaves in the ionosphere. – Cambridge Univ. Press, 1961. – 542 p.

Рыбачек Светлана Тимофеевна – Санкт-Петербургский государственный университет кандидат физ.-мат. наук, доцент, rybachek_st@mail.ru
Белянский Максим Анатольевич – Санкт-Петербургский государственный университет аспирант, maxim_belyansky@mail.ru

УДК 621.37

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА СИГНАЛОВ МАЛОЗАМЕТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

А.В. Коротков

Часто для анализа сигналов малоаметных радиолокационных станций применение традиционных методов, основанных только на различных модификациях преобразования Фурье, оказывается малоэффективным. Показано, что наибольший эффект при проведении частотно-временного анализа сигналов малоаметных радиолокационных станций достигается при совместном применении нескольких частотно-временных преобразований.

Ключевые слова: частотно-временной анализ, радиолокационные сигналы, вейвлет-анализ, преобразование Вигнера.

Введение

В настоящее время большое значение уделяется развитию радиолокационных станций с низкой вероятностью перехвата, которые отличаются специальными мерами снижения мощности передатчика и уровня боковых лепестков, а также существенным увеличением полосы пропускания. При этом энергия радиоизлучения распределяется достаточно равномерно во всей полосе частот с уровнем, не превышающим мощность собственных шумов радиоприемных устройств. Данные радиолокационные станции (РЛС) получили название малоаметных (МРЛС). Примеры МРЛС приведены в таблице.

| Название | Назначение | Мощность, Вт | Базирование | Страна |
|---|---|-----------------------|-------------|--|
| SCOUT VARIANT PILOT | обзор, навигация обзор обзор, навигация | 0,01–1 1 0,01–1 | морское | Нидерланды |
| AN/APQ-181 AN/APS-147 AN/APN-237A | многофункциональная многофункциональная навигационная | – – – | авиационное | США |
| PAGE SQUIRE EL/M-2140 MRSR | ПВО обзор обзор ПВО | 20 0,01–1 70 | наземное | Нидерланды Нидерланды Израиль США |

Таблица. Примеры МРЛС

По мнению зарубежных экспертов, использование МРЛС является одним из ключевых подходов к решению задач обнаружения и распознавания малоразмерных воздушных, а также наземных целей, замаскированных или находящихся в естественных укрытиях.

Основными видами внутриимпульсной модуляции, применяемой в МРЛС, являются частотная модуляция (ЧМ), частотная и фазовая манипуляция и их комбинации. Наиболее распространенной является ЧМ с линейно изменяющейся частотой (ЛЧМ). Для кодирования фазы зондирующего сигнала широко используются коды Баркера, многофазные коды Франка, P1, P2, P3 и P4, а также многопозиционные коды T1, T2, T3 и T4 [1]. Интенсивное использование ведущими зарубежными странами современных МРЛС приводит к необходимости совершенствования известных и разработки новых методов обработки их сигналов с целью последующего распознавания типа источника излучения.

В настоящее время в средствах радиотехнического контроля для решения этой задачи используется процедура частотно-временного анализа, в основе которого лежит реализация динамического (оконного) преобразования Фурье (ДПФ) [2]. Оно является предпочтительным при анализе как широкополосных, так и узкополосных излучений. Но из-за невозможности получения одновременно высокого разрешения по времени и частоте применение только данного преобразования не позволяет получить набор признаков, обеспечивающих достоверное распознавание типа РЛС. Для разрешения этого противоречия в современной математике разработан ряд методов анализа нестационарных сигналов (к этому классу сигналов относятся и квазинепрерывные излучения МРЛС). Широкое применение получили различные виды вейвлет-анализа [3] и преобразование Вигнера. Вместе с тем, каждое отдельно взятое преобразование имеет свои сильные и слабые стороны. Представляется целесообразным применение комплексного метода анализа сигналов МРЛС, который позволил бы компенсировать недостатки одних преобразований достоинствами других.

Предлагается в качестве базового метода использовать оконное ДПФ, а уточнение производить с помощью вейвлет-преобразования (ВП) и преобразования Вигнера (ПВ).

Комбинированный метод анализа сигналов

Предлагается для анализа сигналов МРЛС применение системного подхода, который базируется на совместном применении ряда частотно-временных преобразований – ВП, ДПФ и ПВ. Кратко рассмотрим каждое из них.

Частотно-временное представление сигнала на основе ВП. ВП выполняется при помощи банка квадратурно-зеркальных фильтров (КЗФ) [4]. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.

Вначале выполняется свертка входного сигнала с импульсными характеристиками высоко- и низкочастотных фильтров (h и g). Таким образом, на каждом уровне входной сигнал раскладывается на высоко- и низкочастотные составляющие. Далее следует операция прореживания в два раза. Выход каждого уровня преобразования образует матрицу. Разрешение по частоте и времени определяются формулами

$$\Delta f = \frac{f_s}{2(2^i - 1)}, \Delta t = \frac{n}{f_s(2^{L-i} - 1)},$$

где f_s – частота дискретизации; L – число уровней банка КЗФ; i – номер текущего уровня; n – количество отсчетов входного сигнала.

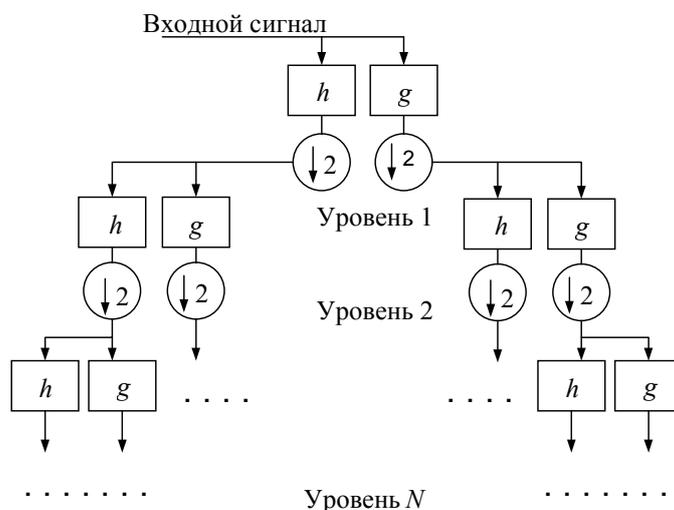


Рис. 1. Схема ВП на основе банка КЗФ

В качестве фильтра предлагается использование модифицированного sinc-фильтра. Коэффициенты фильтра рассчитываются по следующей формуле:

$$h(n) = \sqrt{\frac{S}{2}} \operatorname{sinc} \left(\frac{n+0,5}{C} \right) \omega(n),$$

где C – коэффициент сжатия; S – коэффициент масштабирования, $\omega(n)$ – окно Хемминга. Путем соответствующего сравнения выходных матриц ВП можно определить участки концентрации энергии входного сигнала и оценить их положение и протяженность с высоким разрешением как по частоте, так и по времени. Используя данный подход, можно декомпозировать сигнал и определить его параметры – ширину спектра, несущую частоту и закон модуляции. Эта информация может быть в дальнейшем использована для принятия решения о типе источника излучения.

Частотно-временное представление сигнала на основе ПВ. ПВ [5], введенное в 1932 г. Е. Вигнером в задачах квантовой термодинамики и в 1948 г. использованное Дж. Виллем при обработке сигналов, имеет вид

$$P_V[f(t)] = P_V f(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f\left(\tau + \frac{t}{2}\right) f^*\left(\tau - \frac{t}{2}\right) e^{-j\omega t} dt.$$

Оно представляет собой преобразование Фурье от произведения $f(\tau + t/2)f^*(\tau - t/2)$, где $f(t)$ – анализируемый сигнал, а символ «*» обозначает операцию комплексного сопряжения. Для дискретного сигнала $x(l)$ ПВ с прямоугольным окном длины $2N$ можно записать так:

$$W(l, \omega) = 2 \sum_{n=-N}^{N-1} x(l+n)x^*(l-n)e^{-j2\omega n}, \tag{1}$$

где $l = -N \dots (N-1)$; $\omega = \frac{\pi k}{2N}$; $k = 0, 1, 2 \dots (2N-1)$.

Используя подстановку $f_l(n) = x(l+n)x^*(l-n)$ и учитывая, что $f_l(n) = f_l^*(-n)$, формулу (1) представим в виде

$$W(l, k) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} f_l'(n) e^{-j \frac{\pi k n}{N}},$$

где

$$f_l'(n) = \begin{cases} f_l(n), & 0 \leq n \leq N-1; \\ 0, & n = N; \\ f_l(n-2N), & N+1 \leq n \leq 2N-1. \end{cases}$$

ПВ позволяет получить информацию о том, в какие моменты времени и на каких частотах сосредоточена энергия, содержащаяся в исследуемом сигнале, а также измерить некоторые его параметры, такие как ширина спектра, период модуляции, длину кодовой последовательности.

ПВ для любого многокомпонентного сигнала характеризуется наличием интерференционных составляющих с такой же амплитудой, как и у реального сигнала, и частотой, равной среднему значению двух истинных частот.

Применение комбинированного метода анализа сигналов

В качестве примера рассмотрим применение комбинированного метода для анализа следующих сигналов:

1. частота $f_n = 2,1$ ГГц; полоса сигнала 250 МГц; код Баркера (рис. 2).
2. полоса сигнала 1 ГГц; код Франка $N=4$ (рис. 3).
3. сигнал представляет собой четыре ЛЧМ участка с периодом 0,1 мкс, девиация частоты 1 ГГц (рис. 4).

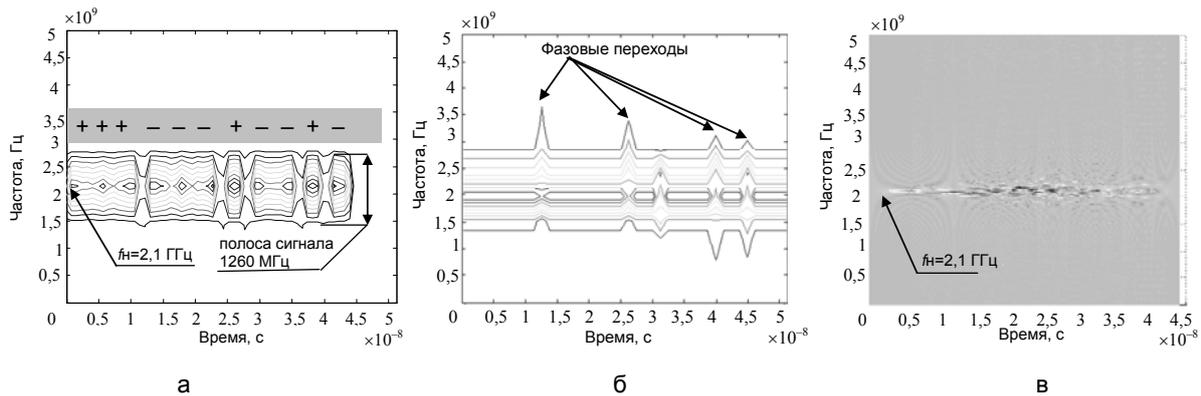


Рис. 2. Код Баркера – ВП уровень 3 (а); ДПФ на 11точек (б); ПВ (в)

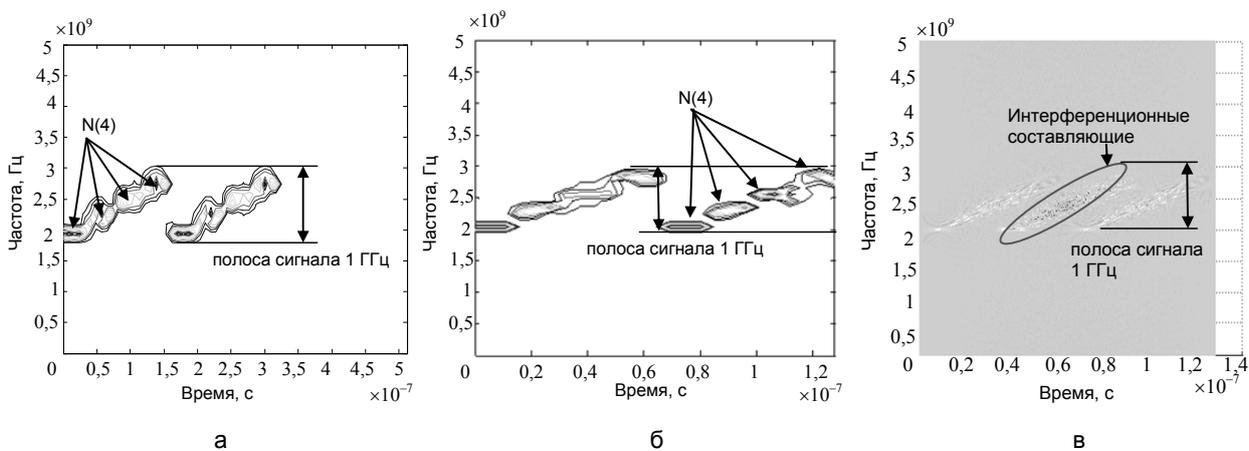


Рис. 3. Код Франка – ВП уровень 5 (а); ДПФ на 50 точек (б); ПВ (в)

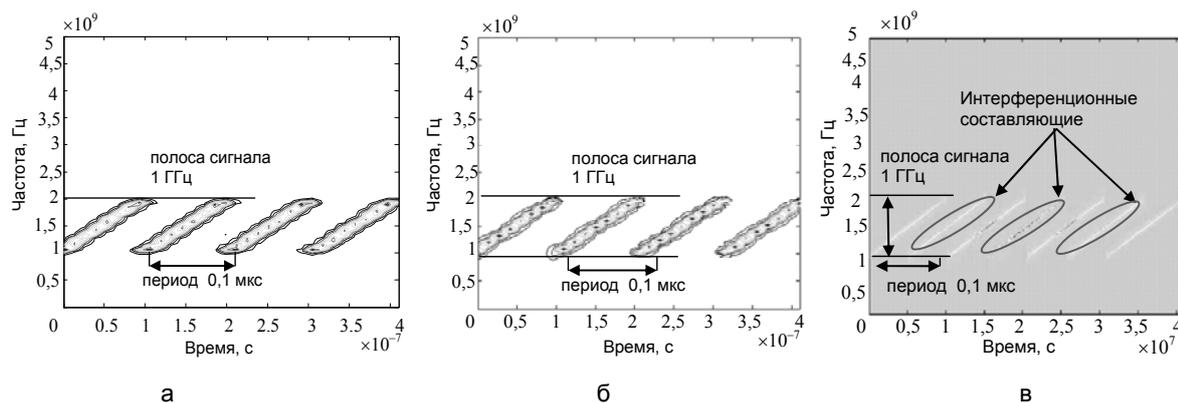


Рис. 4. ЛЧМ сигнал – ВП уровень 7 (а); ДПФ на 128 точек (б); ПВ (в)

Частота дискретизации всех сигналов 10 ГГц.

Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы.

1. В условиях априорной неопределенности, применение ВП требует просмотра нескольких уровней декомпозиции и выбора наиболее информативного. Частотная манипуляция может быть лучше определена на высших уровнях разложения ВП, а фазовая – на низших. В ряде случаев ВП обеспечивает лучшее частотно-временное разрешение, чем преобразование Фурье (рис. 2, а, б).
2. Преобразование Вигнера для любого многокомпонентного сигнала характеризуется наличием интерференционных членов с такой же амплитудой, как и у реального сигнала, и частотой, равной среднему значению двух истинных частот (рис. 3, в; рис. 4, в).
3. Все рассмотренные выше преобразования позволяют определить основные параметры ЛЧМ сигналов (рис. 4).
4. Применение ВП предпочтительно для анализа фазоманипулированных сигналов, в то время как использование ПВ для таких сигналов представляется малоэффективным (рис. 2, в).

Заключение

Предложен комплексный метод анализа сигналов малоаметных радиолокационных станций, основанный на совместном применении нескольких частотно-временных преобразований. Продемонстрировано, что этот метод позволяет компенсировать недостатки одних преобразований достоинствами других. Отмечено, что только одновременное использование различных частотно-временных преобразований дает возможность выявить все локальные особенности исследуемого сигнала. Таким образом, применение данного метода позволит расширить класс анализируемых средствами радиотехнического контроля сигналов и получить первичные признаки для их последующего распознавания.

Литература

1. Pace Phillip E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar. – Artech House, 2009. – 857 p.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 448 с.
3. Казначеева А.О., Власюк А.В., Кудряшов А.В. Возможности вейвлет-преобразований в повышении точности измерений параметров диффузии в МРТ // научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5. – С. 86–91.
4. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
5. Mecklenbrauker W., Hlawatsch F. The Wigner Distribution: Theory and Applications in Signal Processing. – Amsterdam: Elsevier, 1997. – 480 p.

Коротков Андрей Владимирович

– ОАО «НИИ Вектор», инженер, Andrey.k0206516@mail.ru

УДК 112:22.10:241.1

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРА СИНГУЛЯРНЫХ ЧИСЕЛ КВАДРАТНОЙ МАТРИЦЫ ПРОСТОЙ СТРУКТУРЫ

Т.А. Акунов, Д.С. Бирюков, Н.А. Дударенко, М.В. Полякова, А.В. Ушаков

Исследуется возможность формирования спектра сингулярных чисел квадратной матрицы простой структуры, для чего используется связь этого спектра со спектром ее собственных значений, которая определяется числом обусловленности модальной матрицы. Задача решается с использованием алгоритмических возможностей обобщенного модального управления. Приводится пример.

Ключевые слова: модальное разложение, сингулярное разложение, сингулярные числа, собственные значения, собственные вектора, число обусловленности, обобщенное модальное управление.

Введение. Постановка задачи

Сингулярное разложение, SVD (singular value decomposition) [1–4] матриц прочно вошло в практику специалистов по системному SVD-анализу динамических процессов. Круг задач, решаемых с помощью сингулярного разложения [5] матриц, достаточно широк. Это задачи оценивания параметров, скаляризации векторных процессов в многомерных системах управления путем введения эллипсоидных оценок [6], приближения методом наименьших квадратов. Сингулярное разложение позволяет контролировать плавное изменение ранга матрицы с помощью ее числа обусловленности или функционалов вырождения [7, 8], оно стало конструктивным инструментом при решении задач регрессионного анализа [9], а также задач, основанных на грамианном подходе [10], и задач, связанных с контролем вырождения динамических систем типа многомерный вход – многомерный выход [7]. В теории оптических приборов SVD-анализ матрицы преобразования лучевого вектора [11] позволяет выделять факторы, вариация которых приводит к максимальной разъюстировке оптических систем. Тем не менее, задача формирования матриц с заданным спектром сингулярных чисел пока не решена, в то время как задача формирования матриц с заданным спектром собственных значений, получившая в современной теории динамических систем название «модальное управление», имеет хорошее алгоритмическое обеспечение и достаточно обширную библиографическую поддержку [6, 12, 13]. Решение задачи, поставленной заголовком настоящей работы, опирается на возможности инструментария обобщенного модального управления (ОМУ) [13] как расширенной версии модального управления.

Модальное разложение квадратной матрицы простой структуры

Рассмотрим матрицу N размерности $\dim(N) = (n \times n)$, которая характеризуется алгебраическим спектром $\sigma(N)$ собственных значений $\{\lambda_i; i = \overline{1, n}\}$, вычисляемых в силу соотношения $\sigma(N) = \{\lambda_i : (\det(\lambda I - N) = 0); i = \overline{1, n}\}$, и геометрическим спектром собственных векторов $\{\xi_i; i = \overline{1, n}\}$, удовлетворяющих условию $\xi_i = \arg\{N\xi_i = \lambda_i\xi_i\}; i = \overline{1, n}$.

Если матрица N является матрицей простой структуры, то для элементов алгебраического спектра этой матрицы выполняется соотношение

$$\lambda_i \neq \lambda_j \text{ при } i \neq j; i, j = \overline{1, n}.$$

Построим на элементах $\{\lambda_i; i = \overline{1, n}\}$ алгебраического спектра матрицы N диагональную матрицу $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_i; i = \overline{1, n}\}$. Нетрудно видеть, что в силу критериев подобия матриц [14] матрицы N и Λ являются подобными, так что существует неособая $(n \times n)$ матрица M , позволяющая записать матричное соотношение

$$M\Lambda = NM. \quad (1)$$

Следует заметить, что столбцы $M_i; i = \overline{1, n}$ матрицы

$$M = [M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n] \quad (2)$$

являются собственными векторами матрицы N , так что выполняются равенства

$$NM_i = \lambda_i M_i; i = \overline{1, n}; M_i = \xi_i. \quad (3)$$

Это легко доказывается выделением в левой и правой частях (1) i -ых столбцов Λ_i и M_i , для которых получим

$$M\Lambda_i = NM_i; i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Таким образом, решение матричного уравнения (1) сведено к решению n матрично-векторных уравнений (4). Для решения этого уравнения относительно столбца M_i воспользуемся тем, что Λ_i есть i -ый столбец диагональной матрицы Λ , т.е.

$$\Lambda_i = [0_{1 \times (i-1)}, \lambda_i, 0_{1 \times (n-i)}]^T. \quad (5)$$

Столбец Λ_i вида (5) с учетом представления матрицы \mathbf{M} в форме (2) приводит уравнение (4) к виду (3).

Определение 1. Матрица \mathbf{M} приведения подобия в форме (1), составленная из собственных векторов $\mathbf{M}_i = \xi_i$ матрицы \mathbf{N} , называется модальной матрицей (матрицы \mathbf{N}). \square

Определение 2. Модальным разложением матрицы \mathbf{N} простой структуры называется представление ее в виде

$$\mathbf{N} = \mathbf{M}\mathbf{\Lambda}\mathbf{M}^{-1}. \quad (6)$$

Сингулярное разложение квадратной матрицы простой структуры

Определение 3. Сингулярным разложением [5] ($n \times n$) квадратной матрицы \mathbf{N} , называется представление ее в форме

$$\mathbf{N} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{\Sigma} \cdot \mathbf{V}^T, \quad (7)$$

где \mathbf{U} – ортогональная $n \times n$ матрица, столбцы \mathbf{U}_i ($i = \overline{1, n}$) которой образуют левый сингулярный базис, так что выполняются соотношения

$$\mathbf{U}_i^T \times \mathbf{U}_j = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases} \Rightarrow \mathbf{U}\mathbf{U}^T = \mathbf{U}^T\mathbf{U} = \mathbf{I} \Rightarrow \|\mathbf{U}\| = 1; \quad (8)$$

\mathbf{V} – ортогональная $n \times n$ матрица, столбцы \mathbf{V}_i ($i = \overline{1, n}$) которой образуют правый сингулярный базис, так что выполняются соотношения вида (8)

$$\mathbf{V}_i^T \times \mathbf{V}_j = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases} \Rightarrow \mathbf{V}\mathbf{V}^T = \mathbf{V}^T\mathbf{V} = \mathbf{I} \Rightarrow \|\mathbf{V}\| = 1; \quad (9)$$

$\mathbf{\Sigma}$ – диагональная матрица размерности $n \times n$ с сингулярными числами $\alpha_i \geq 0$ на главной диагонали, которая принимает вид

$$\mathbf{\Sigma} = \text{diag}\{\alpha_i : i = \overline{1, n}\}.$$

Оказываются справедливыми следующие положения.

1. Столбцы \mathbf{U}_i матрицы \mathbf{U} являются собственными векторами матрицы $\mathbf{N}\mathbf{N}^T$, так что выполняется векторно-матричное соотношение

$$\mathbf{N}\mathbf{N}^T\mathbf{U}_i = \mu_i \mathbf{U}_i; i = \overline{1, n};$$

где μ_i – собственное значение матрицы $\mathbf{N}\mathbf{N}^T$, вычисляемое в силу решения характеристического уравнения

$$\det(\mu \mathbf{I} - \mathbf{N}\mathbf{N}^T) = 0;$$

2. Столбцы \mathbf{V}_j матрицы \mathbf{V} являются собственными векторами матрицы $\mathbf{N}^T\mathbf{N}$ так, что выполняется векторно-матричное соотношение

$$\mathbf{N}^T\mathbf{N}\mathbf{V}_j = \mu_j \mathbf{V}_j; j = \overline{1, n};$$

где μ_j – собственное значение матрицы $\mathbf{N}^T\mathbf{N}$, вычисляемое в силу решения характеристического уравнения

$$\det(\mu \mathbf{I} - \mathbf{N}^T\mathbf{N}) = 0;$$

3. Сингулярные числа α_i матрицы \mathbf{N} вычисляются в силу соотношения

$$\alpha = |\mu_i^{1/2}|, i = \overline{1, n}.$$

Остановимся на свойствах сингулярных чисел матрицы \mathbf{N} .

Свойство 1. Сингулярные числа α_i матрицы \mathbf{N} неотрицательны, $\alpha_i \geq 0; i = \overline{1, n}$. При этом спектр $\sigma_\alpha(\mathbf{N}) = \{\alpha_i; i = \overline{1, n}\}$ сингулярных чисел формируется так, что $\alpha_1 = \max_i \{\alpha_i; i = \overline{1, n}\}$, $\alpha_n = \min_i \{\alpha_i; i = \overline{1, n}\}$, $\alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_n$.

Свойство 2. Характеристические полиномы матриц $\mathbf{N}^T\mathbf{N}$ и $\mathbf{N}\mathbf{N}^T$ в случае квадратной матрицы \mathbf{N} совпадают, так что выполняются равенства

$$\det(\mu \mathbf{I} - \mathbf{N}\mathbf{N}^T) = \det(\mu \mathbf{I} - \mathbf{N}^T \mathbf{N}).$$

Свойство 3. Матрицы $\tilde{\mathbf{N}}$ и $\tilde{\tilde{\mathbf{N}}}$, полученные умножением \mathbf{N} на ортогональную матрицу \mathbf{R} справа или ортогональную матрицу \mathbf{Q} слева, обладают тем же спектром сингулярных чисел, что и матрица \mathbf{N} , так что выполняются условия

$$\sigma_\alpha \{\tilde{\mathbf{N}}\} = \sigma_\alpha \{\mathbf{NR}\} = \sigma_\alpha \{\mathbf{N}\}; \quad \sigma_\alpha \{\tilde{\tilde{\mathbf{N}}}\} = \sigma_\alpha \{\mathbf{QN}\} = \sigma_\alpha \{\mathbf{N}\}.$$

Свойство 4. Если матрица \mathbf{N} – диагональная, $\mathbf{N} = \text{diag}\{\lambda_i; i = \overline{1, n}\}$, то $\alpha_i = |\lambda_i|$, следовательно $\Sigma = \text{diag}\{\alpha_i = |\lambda_i|\}$.

Свойство 5. Если матрица \mathbf{N} – симметричная, $\mathbf{N} = \mathbf{N}^T$, и характеризуется спектром собственных значений $\sigma\{\mathbf{N}\} = \{\lambda_i; i = \overline{1, n}\}$, то сингулярные числа α_i этой матрицы удовлетворяют условию $\alpha_i = |\lambda_i|$, а, следовательно, $\Sigma = \text{diag}\{\alpha_i = |\lambda_i|\}$.

Рассмотрим геометрическую интерпретацию сингулярного разложения. Матрица \mathbf{N} действует на элемент \mathbf{V}_j ($j = \overline{1, n}$) правого сингулярного базиса так, что он отображается в линейную оболочку, натянутую на элемент \mathbf{U}_j ($j = \overline{1, n}$) левого сингулярного базиса матрицы \mathbf{N} , при этом выполняется векторно-матричное равенство

$$\mathbf{N}\mathbf{V}_j = \alpha_j \mathbf{U}_j; \quad (j = \overline{1, n}). \tag{10}$$

Линейное отображение

$$y = \mathbf{N}x \tag{11}$$

отображает единичную сферу $\|x\| = 1$ в эллипсоид, максимальная полуось которого, совпадает с вектором $y = \alpha_1 \mathbf{U}_1$, а минимальная – с вектором $y = \alpha_n \mathbf{U}_n$. Действительно, разложим вектор x по элементам правого сингулярного базиса, записав его в форме

$$x = \sum_{j=1}^n \gamma_j \mathbf{V}_j; \quad \gamma_j = \arg \left\{ \sum_{j=1}^n \gamma_j^2 = 1 \right\}. \tag{12}$$

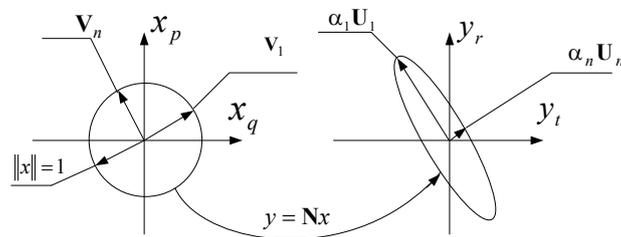


Рисунок. Геометрическая интерпретация линейного отображения $y = \mathbf{N}x$ сферы $\|x\| = 1$

Тогда подстановка (12) в (11) с учетом (10) приводит к результату

$$y = \mathbf{N}x = \sum_{j=1}^n \gamma_j \mathbf{N}\mathbf{V}_j = \sum_{j=1}^n \gamma_j \alpha_j \mathbf{U}_j \Rightarrow \begin{cases} y = \alpha_1 \mathbf{U}_1 \text{ при } x = \mathbf{V}_1; \\ y = \alpha_n \mathbf{U}_n \text{ при } x = \mathbf{V}_n. \end{cases} \tag{13}$$

Соотношения (13) хорошо иллюстрируются рисунком.

Связь спектров сингулярных чисел и собственных значений

Покажем, что степень близости спектра сингулярных чисел матрицы \mathbf{N} к спектру модулей ее собственных значений в смысле свойств 4 и 1 (при этом носителем первого является диагональная матрица $\Sigma = \text{diag}\{\alpha_i; i = \overline{1, n}\}$, а второго – диагональная матрица $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_i; i = \overline{1, n}\}$) определяется числом обусловленности $C\{\mathbf{M}\}$ модальной матрицы \mathbf{M} в силу неравенства

$$\|\Sigma\| \leq C\{\mathbf{M}\} \|\Lambda\|, \tag{14}$$

Действительно на основании (6) и (7) становится справедливым матричное соотношение $\Sigma = \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \Lambda \cdot \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{V}$, переход в котором к нормам с учетом свойств (8) и (9) приводит к (14).

Неравенство (14) положим в основу построения алгоритма конструирования матриц простой структуры с желаемым спектром сингулярных чисел путем формирования матрицы \mathbf{N} с желаемым спектром собственных значений и спектром собственных векторов, доставляющих модальной матрице \mathbf{M} значение числа обусловленности $C\{\mathbf{M}\}$, близкое к единице. Конструирование такой матрицы осуществляется с использованием возможностей метода обобщенного модального управления [13].

Основной результат. Алгоритм формирования квадратных матриц простой структуры с желаемым спектром сингулярных чисел

К настоящему моменту сформировалась процедура синтеза ОМУ [7, 12], с помощью которой матрице состояния проектируемой системы доставляется желаемая структура как собственных значений, так и собственных векторов.

Суть этой процедуры состоит в следующем. Если записать соотношение подобия (1) в виде однородного матричного уравнения $\mathbf{M}\mathbf{A} - \mathbf{N}\mathbf{M} = 0$, то его с помощью аддитивно-мультипликативной декомпозиции матрицы \mathbf{N} в форме $\mathbf{N} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$, где $\mathbf{K} = \mathbf{H}\mathbf{M}^{-1}$, можно свести к неоднородному матричному уравнению $\mathbf{M}\mathbf{A} - \mathbf{A}\mathbf{M} = -\mathbf{B}\mathbf{H}$, именуемому матричным уравнением Сильвестра (УС). Решение УС относительно модальной матрицы \mathbf{M} с желаемым числом обусловленности определяется выбором матрицы \mathbf{H} . Таким образом, на основе решения УС и использования соотношения (21) можно предложить следующий алгоритм синтеза матрицы простой структуры с заданным спектром сингулярных чисел.

Шаг 1. Задать желаемый спектр $\sigma_\alpha\{\mathbf{N}\} = \{\alpha_i : i = \overline{1, n}\}$ сингулярных чисел матрицы \mathbf{N} , сформировать матрицу $\Sigma = \text{diag}\{\alpha_i; i = \overline{1, n}\}$;

Шаг 2. Построить на спектре $\sigma_\alpha\{\mathbf{N}\}$ сингулярных чисел диагональную матрицу $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_i : |\lambda_i| = \alpha_i; i = \overline{1, n}\}$;

Шаг 3. Построить матрицу $\mathbf{M} = \arg\{C\{\mathbf{M}\} = 1\}$, для чего взять произвольную $(n \times n)$ матрицу \mathbf{P} , сформировать ее SVD-разложение $\mathbf{P} = \mathbf{U}_p \Sigma_p \mathbf{V}_p^T$ и положить $\mathbf{M} = \mathbf{U}_p$ или $\mathbf{M} = \mathbf{V}_p$, что обеспечит матрице \mathbf{M} ортонормированность столбцов, гарантирующую выполнения условия $\mathbf{M} = \arg\{C\{\mathbf{M}\} = 1\}$;

Шаг 4. Сформировать произвольную $(n \times n)$ матрицу \mathbf{A} такую, чтобы алгебраические спектры $\sigma\{\mathbf{A}\}$ и $\sigma\{\Lambda\}$ собственных значений матриц \mathbf{A} и Λ не пересекались: $\sigma\{\mathbf{A}\} \cap \sigma\{\Lambda\} = \emptyset$;

Шаг 5. Сформировать произвольную $(n \times r)$ матрицу \mathbf{B} такую, чтобы она с матрицей \mathbf{A} образовывала управляемую пару $\{\mathbf{A}, \mathbf{B}\}$; при этом, если $\text{rang}(\mathbf{B}) = r < n$, то перейти к шагу 6 алгоритма, если $\text{rang}(\mathbf{B}) = r = n$, то перейти к шагу 8;

Шаг 6. Оценить принадлежность матрицы $(\mathbf{A}\mathbf{M} - \mathbf{M}\Lambda)$ образу матрицы \mathbf{B} : $(\mathbf{A}\mathbf{M} - \mathbf{M}\Lambda) \in \text{Im}(\mathbf{B})$, если включение выполняется, то перейти к шагу 7, иначе – к шагу 5;

Шаг 7. Решить матричное уравнение Сильвестра $\mathbf{M}\Lambda - \mathbf{A}\mathbf{M} = -\mathbf{B}\mathbf{H}$ относительно матрицы \mathbf{H} в форме $\mathbf{H} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T (\mathbf{A}\mathbf{M} - \mathbf{M}\Lambda)$ и перейти к шагу 8;

Шаг 8. Для случая $\text{rang}(\mathbf{B}) = n$ решить матричное уравнение Сильвестра $\mathbf{M}\Lambda - \mathbf{A}\mathbf{M} = -\mathbf{B}\mathbf{H}$ относительно матрицы \mathbf{H} в форме $\mathbf{H} = \arg\{\mathbf{M}\Lambda - \mathbf{A}\mathbf{M} = -\mathbf{B}\mathbf{H}\} = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A}\mathbf{M} - \mathbf{M}\Lambda)$;

Шаг 9. Сформировать матрицу \mathbf{N} в форме $\mathbf{N} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$, где $\mathbf{K} = \mathbf{H}\mathbf{M}^{-1}$;

Шаг 10. Осуществить сингулярное разложение матрицы \mathbf{N} в форме (7) и проверить выполнение условия

$$\Sigma = |\Lambda| = \text{diag}\{|\lambda_i| = \alpha_i; i = \overline{1, n}\}. \quad \blacksquare$$

Пример

Постановка задачи. Сконструировать (2×2) матрицу \mathbf{N} со спектром сингулярных чисел $\sigma_\alpha(\mathbf{N}) = \{\alpha_1 = 7; \alpha_2 = 1\}$.

Решение. Следуем алгоритму.

1. Формируем матрицу $\Sigma = \text{diag}\{\alpha_1 = 7; \alpha_2 = 1\} = \begin{bmatrix} 7 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$;

2. Формируем диагональную матрицу $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1 = -7; \lambda_2 = -1\}$;

3. Формируем произвольную невырожденную (2×2) – матрицу $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}$, строим ее сингулярное разложение $\mathbf{P} = \mathbf{U}_p \mathbf{\Sigma}_p \mathbf{V}_p^T = \begin{bmatrix} -0,4045 & -0,9145 \\ -0,9145 & 0,4045 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5,465 & 0 \\ 0 & 0,366 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,576 & 0,8174 \\ -0,8174 & -0,576 \end{bmatrix}$, формируем модальную матрицу $\mathbf{M} = \mathbf{U}_p = \begin{bmatrix} 0,4045 & -0,9145 \\ 0,9145 & 0,4045 \end{bmatrix}$;
4. Формируем (2×2) матрицу $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$: $\sigma\{\mathbf{A}\} \cap \sigma\{\mathbf{\Lambda}\} = \emptyset$;
5. Формируем произвольную (2×2) матрицу $\mathbf{B} = \arg\{rang(\mathbf{B}) = n = 2\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$;
6. Выполняем Шаг 7. Решаем матричное уравнение Сильвестра относительно матрицы $\mathbf{H} = \arg\{\mathbf{M}\mathbf{\Lambda} - \mathbf{A}\mathbf{M} = -\mathbf{B}\mathbf{H}\} = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A}\mathbf{M} - \mathbf{M}\mathbf{\Lambda}) = \begin{bmatrix} 5,874 & -2,849 \\ 2,55 & 2,638 \end{bmatrix}$;
7. Формируем матрицу \mathbf{N} в форме $\mathbf{N} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{H}\mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} -1,982 & -2,22 \\ -2,22 & -6,02 \end{bmatrix}$;
8. С помощью сингулярного разложения матрицы \mathbf{N} строим ее спектр сингулярных чисел $\sigma_\alpha(\mathbf{N}) = \{\alpha_1 = 7; \alpha_2 = 1\}$.

Заключение

На основе контроля числа обусловленности модальной матрицы с помощью алгоритмических возможностей обобщенного модального управления решена задача формирования матрицы с желаемым спектром сингулярных чисел. Задача решена для матриц простой структуры.

Литература

1. Замарашкин Н.Л., Тыртышников Е.Е. Распределение собственных и сингулярных чисел теплицевых матриц при ослабленных требованиях к производящей функции // Мат. сборник. – 1997. – Т. 188. – С. 83–92.
2. Wall M.E., Rechtsteiner A., Rocha L.M. Singular value decomposition and principal component analysis // A Practical Approach to Microarray Data Analysis. – Kluwer. – 2003. – P. 91–109.
3. Yeung M.K., Tegner J., Collins J.J. Reverse engineering gene networks using singular value decomposition and robust regression // Proc Natl Acad Sci USA. – 2002. – V. 55. – № 9. – P. 6163–6168.
4. Romo T.D., Clarage J.B., Sorensen D.C., Phillips G.N. Jr. Automatic identification of discrete substates in proteins: singular value decomposition analysis of time-averaged crystallographic refinements // Proteins. – 1995. – V. 22. – P. 311–321.
5. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 548 с.
6. Акунов Т.А., Ушаков А.В. Анализ чувствительности эллипсоидных оценок многомерных процессов управления // Изв. вузов. Приборостроение. – 1991. – Т. 34. – № 8. – С. 21–27.
7. Дударенко Н.А., Полякова М.В., Ушаков А.В. Вычислительные проблемы формирования функционалов вырождения сложных технических систем с интервальными матричными компонентами // Проблемы управления. – 2011. – № 2. – С. 31–36.
8. Дударенко Н.А., Слита О.В., Ушаков А.В. Математические основы современной теории управления: аппарат метода пространства состояний: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 324 с.
9. Jessup E.R., Sorensen D.C. A parallel algorithm for computing the singular-value decomposition of a matrix // Siam Journal on Matrix Analysis and Applications. – 1994. – V. 15. – № 2. – P. 530–548.
10. Бирюков Д.С., Ушаков А.В. Контроль затрат на управление при воспроизведении гармонических экзогенных воздействий: грамианный подход // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2. – С. 117–122.
11. Джерард А., Берч Дж. Введение в матричную оптику. – М.: Мир, 1978. – 341 с.
12. Григорьев В.В., Дроздов В.Н., Лаврентьев В.В., Ушаков А.В. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 357 с.
13. Ушаков А.В. Обобщенное модальное управление // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – Т. 43. – № 3. – С. 8–15.
14. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1973. – 576 с.

- Акунов Таалайбек Абакирович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, докторант, takunov@mail.ru
- Бирюков Дмитрий Сергеевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, quaint03@mail.ru
- Дударенко Наталия Александровна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, dudarenko@yandex.ru
- Полякова Майя Вячеславовна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, 12noch@mail.ru
- Ушаков Анатолий Владимирович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ushakov-AVG@yandex.ru

УДК 004.932

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕФОКУСИРОВКИ И ШУМА
НА КАЧЕСТВО ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ**

В.В. Беззубик, Н.Р. Белашенков, В.О. Никифоров

Предложен комбинированный подход к количественной оценке контраста и резкости цифрового изображения. Проведен анализ влияния дефокусировки и пространственного шума на качество изображения. Получены зависимости контраста и резкости от дефокусировки при различных уровнях гауссова шума. Показана необходимость совместного учета контраста и резкости для оценки качества цифровых изображений.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, контраст, резкость, дефокусировка, шум.

Введение

Решение проблемы корректного выбора количественных критериев оценки качества цифровых изображений имеет большое значение при разработке и построении наблюдательных систем с фотоэлектронными каналами регистрации. Наиболее важными параметрами изображения, определяющими его качество при чувственном восприятии, принято считать контраст и резкость. Аберрации оптических систем, точность выбора положения наилучшей фокусировки, условия освещенности наблюдаемых объектов – вот далеко не полный перечень факторов, влияющих на качество изображения, формируемого на приемной площадке матричного фотоприемника. Дополнительное негативное влияние на качество цифрового изображения оказывают неустраняемые шумы каналов регистрации. Именно их наличие во многом сводит на нет усилия разработчиков по оптимизации алгоритмов улучшения качества изображений путем адаптивного управления характеристиками тракта регистрации.

В ранее опубликованных работах, посвященных исследованиям проблемы выбора количественных критериев контраста и резкости цифровых изображений [1–15], обоснован ряд методов, позволяющих с той или иной достоверностью вычислять количественные меры контраста и резкости. Однако само количество этих работ и разнообразие описанных в них подходов дают основание полагать, что эти исследования преждевременно считать завершенными.

Исторически первым критерием качества цифрового изображения был выбран контраст как величина, наиболее удобная для количественной оценки. Первоначально величину контраста вычисляли применительно к изображению в целом, руководствуясь известной формулой Майкельсона [16]. Однако достаточно скоро стало ясно, что данный критерий, сформулированный для периодических структур типа интерференционных картин, не подходит для произвольных изображений. В результате был предложен принцип вычисления локального контраста для каждой точки изображения по значениям интенсивностей в некоторой ее окрестности с последующим определением глобального контраста путем суммирования значений локальных контрастов. Для произвольных цифровых изображений было сформулировано и стало общепринятым определение контраста как отношения среднеквадратичного отклонения значений интенсивностей, регистрируемых матричными элементами (пикселями) фотоприемника, к среднему в пределах изображения значению интенсивности [1]. Данное определение широко применяется в настоящее время для вычисления контраста изображения как непосредственно, так и путем суммирования локальных контрастов в отдельных его точках. В более поздних работах авторами были предложены иные подходы к расчету контраста цифровых изображений, основанные, например, на анализе гистограмм яркости. Однако в большинстве публикаций ответственные авторы оставляли замечания о существенном снижении эффективности предлагаемых ими алгоритмов при наличии на изображении мелкомасштабных пространственных шумов.

Другой важнейшей характеристикой цифрового изображения является резкость, т.е. степень размытости границ между соседними участками изображения с разной оптической плотностью (яркостью). Для количественной оценки резкости, как правило, применяют методы анализа, основанные на выделении контуров, присутствующих на изображении объектов. Обычно используют свертки различных операторов (Робертса, Собеля, Превитта, Лапласа и других) для интенсивностей изображения в отдельных его точках с последующим суммированием. Эти методы весьма неплохо работают для контрастных изображений с четкими границами объектов и существенно снижают свою эффективность при уменьшении контраста и наличии пространственных шумов. Рекомендации некоторых авторов по выполнению предварительной частотной либо медианной фильтрации изображений с целью уменьшения вклада шумовой компоненты в результат вычисления резкости со всей очевидностью демонстрируют ограниченность предлагаемых приемов.

Проблема количественного определения контраста и резкости изображений не стояла бы столь остро, если бы вопрос касался лишь оценки качества изображения с точки зрения чувственного восприятия человека. Однако в наблюдательных системах, включающих оптико-цифровой канал регистрации изображения с функцией пассивной автофокусировки (т.е. автофокусировки, осуществляемой в результате анализа получаемых цифровых изображений с последующим выбором положения наилучшей фокусировки), количественная оценка контраста и резкости становится принципиально важной. Особую значимость при этом приобретают достоверность указанной оценки, а также избирательность и производительность осуществляющих ее алгоритмов. Под достоверностью контраста и резкости будем понимать устойчивость алгоритма их вычисления к наличию пространственных шумов на изображении, а под избирательностью – возможность различать малые изменения этих величин, связанные, например, с погрешностями определения положения наилучшей фокусировки. Проблема заключается в поиске компромисса между указанными характеристиками, который в различных системах достигается по-разному.

В работе [15] были представлены результаты исследования нового метода определения контраста цифровых изображений, с помощью которого можно существенно уменьшить влияние пространственных шумов без выполнения предшествующих операций преобразования изображений, неизбежно снижающих их информативность. В настоящей работе предложен комбинированный подход к вычислению количественных мер контраста и резкости цифровых изображений с учетом влияния имеющихся на них пространственных шумов и дефокусировки, показана необходимость их совместного учета для оценки качества цифровых изображений.

Описание метода и эксперимент

Проанализируем возможность использования критериев контраста и резкости для оценки качества цифровых изображений с учетом влияния дефокусировки и имеющихся на них пространственных шумов. Для этого рассмотрим монохромное цифровое изображение размером $M \times N$ и для каждого его пикселя с координатами (i, j) и яркостью $I^{i,j}$ определим симметричную окрестность $m \times n$, где величины m и n являются нечетными и принимают значения больше 1. Далее определим контраст C и резкость S изображения в соответствии с выражениями

$$C = \sum_{i=(m+1)/2}^{M-(m-1)/2} \sum_{j=(n+1)/2}^{N-(n-1)/2} \sqrt{(X_c^{i,j})^2 + (Y_c^{i,j})^2} \quad (1)$$

и

$$S = \sum_{i=(m+1)/2}^{M-(m-1)/2} \sum_{j=(n+1)/2}^{N-(n-1)/2} \sqrt{(X_s^{i,j})^2 + (Y_s^{i,j})^2}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} X_c^{i,j} &= \frac{1}{\bar{I}^{i,j}} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} p \times (I^{i+p,j+q} - \bar{I}^{i,j}), \\ Y_c^{i,j} &= \frac{1}{\bar{I}^{i,j}} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} q \times (I^{i+p,j+q} - \bar{I}^{i,j}), \\ X_s^{i,j} &= \frac{1}{\bar{I}^{i,j}} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} p \times |I^{i+p,j+q} - \bar{I}^{i,j}|, \\ Y_s^{i,j} &= \frac{1}{\bar{I}^{i,j}} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} q \times |I^{i+p,j+q} - \bar{I}^{i,j}|, \\ \bar{I}^{i,j} &= \frac{1}{m \times n} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} I^{i+p,j+q}. \end{aligned}$$

Формула (1) для расчета контраста цифрового изображения на основе представления «центров масс» была предложена и обоснована в работе [15], формула (2) предлагается авторами впервые и, как будет показано ниже, обеспечивает адекватную количественную оценку резкости изображения.

Иллюстрация расчетной модели представлена на рис. 1.

Для цели последующего анализа будем полагать, что цифровое изображение описывается функцией g , имеющей вид

$$g(i, j) = f(i, j) \otimes h(i, j) + n(i, j), \quad (3)$$

где f – «идеальное» модельное изображение; h – функция рассеяния точки; n – аддитивная составляющая шума, а символ \otimes обозначает операцию свертки.

Таким образом, с помощью выражения (3) можно описывать цифровые изображения с различной степенью размытия границ объектов (дефокусировки) и добавления пространственных шумов. На практике функцию рассеяния точки обычно аппроксимируют гауссовой функцией с параметром размытия границ β .

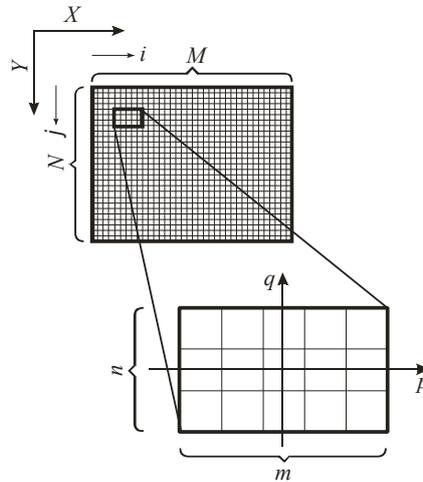


Рис. 1. Расчетная модель метода вычисления локального контраста и резкости цифрового изображения

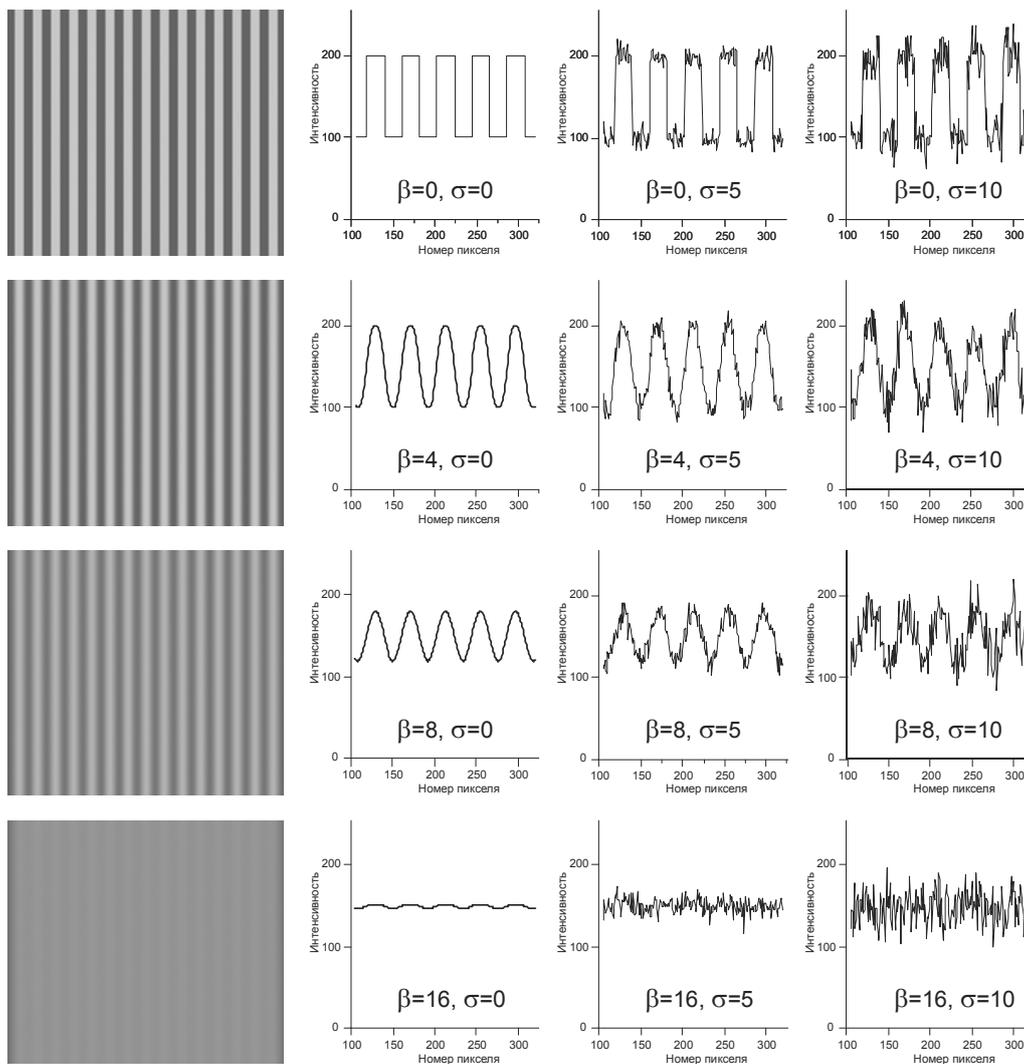


Рис. 2. Тестовые изображения с различной степенью дефокусировки β и шума σ

В качестве добавленного шума в данной работе будем использовать гауссов шум с нулевым средним значением и параметром дисперсии σ .

Будем полагать, что наивысшим качеством обладает цифровое изображение с максимальным контрастом и резкостью. В качестве модельного изображения f выберем синтетическую монохромную миру, представляющую собой чередующиеся светлые и темные вертикальные полосы шириной 21 пиксель. При 256 градациях серого яркость светлых полос этой миры составляет 200 единиц, а темных – 100.

На рис. 2 представлены тестовые цифровые изображения g и их горизонтальные профили интенсивности с различными параметрами β и σ . Последовательно сверху вниз расположены профили изображений с увеличением значений параметра размытия границ, а слева направо – с увеличением дисперсии шума.

Результаты и обсуждение

Расчет контраста и резкости по формулам (1), (2) был выполнен при $m=n=5$. Результаты расчетов приведены на рис. 3, 4.

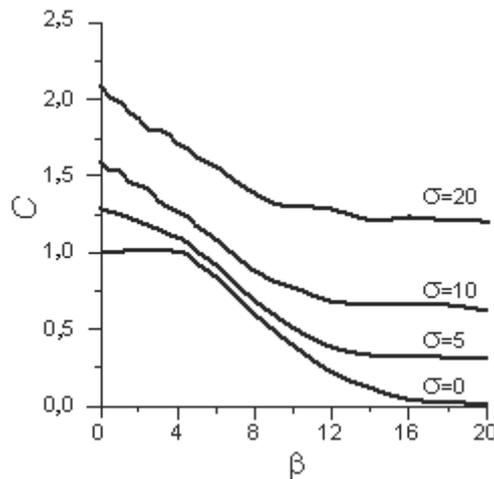


Рис. 3. Зависимости нормированного контраста изображения от дефокусировки при различных уровнях добавленного шума

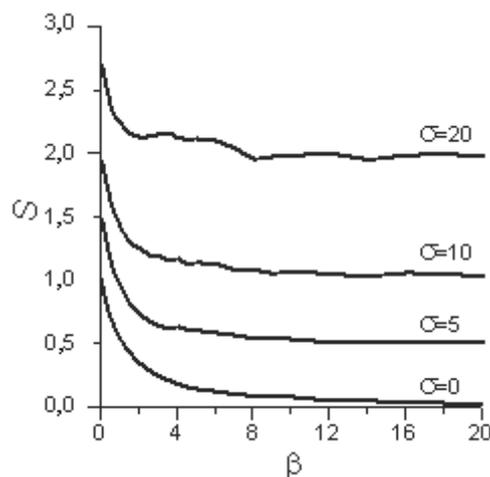


Рис. 4. Зависимости нормированной резкости изображения от дефокусировки при различных уровнях добавленного шума

Зависимости, представленные на рис. 3, 4, нормированы на значения контраста и резкости модельного изображения без дефокусировки ($\beta=0$) и при отсутствии шума ($\sigma=0$) соответственно.

Из рис. 3 видно, что при $\sigma=0$, при малых величинах дефокусировки, контраст изображения остается практически постоянным и начинает уменьшаться с ростом β только после того, как радиус размытия достигает значения, характеризующего перекрытие границ изображений соседних объектов (в наших расчетах это характеристическое значение β равно 4). Качественно данная зависимость полностью сов-

падает с кривой контраста, рассчитанного классическим методом и вычисляемого как сумма локальных контрастов, каждый из которых равен отношению среднеквадратичного отклонения значений интенсивностей к среднему в пределах области изображения заданного размера. При наложении шума контраст изображения увеличивается, однако разница между контрастами модельного изображения и изображений с размытыми из-за дефокусировки границами уменьшается. При этом слабо зашумленные изображения в области малых значений дефокусировки отличаются по контрасту незначительно.

Аналогичные зависимости резкости изображения от дефокусировки, представленные на рис. 4, имеют несколько отличный от кривых контраста вид. Прежде всего, кривая резкости при $\sigma=0$ имеет четкий максимум в точке $\beta=0$ с максимальным значением производной. При наложении шума резкость изображения увеличивается, причем падение отношения сигнал/шум для резкости дефокусированных изображений нарастает с увеличением β . Так, например, при $\sigma=0$ резкость дефокусированного изображения с параметром $\beta=4$ примерно в пять раз меньше, чем резкость модельного изображения, а при $\sigma=10$ это отношение уменьшается до 1,6. С увеличением шумовой составляющей область дефокусировок изображения, в которой резкость остается практически постоянной, непрерывно увеличивается (при $\sigma=10$ изменение резкости изображения в диапазоне значений β от 4 до 20 составляет несколько процентов, что лежит в пределах погрешности вычислений).

Анализ представленных на рис. 3, 4 зависимостей показывает, что контраст свободного от шумов изображения не изменяется при малых дефокусировках, а при наличии на изображении слабых шумов изменяется недостаточно, чтобы служить индикатором степени дефокусировки. Напротив, резкость идеальным образом характеризует качество незашумленного изображения, однако на практике цифровые изображения всегда содержат шумовую составляющую, а в этих случаях избирательная способность резкости в отношении дефокусировки падает. При регистрации цифровых изображений заранее неизвестны параметры дефокусировки и уровень пространственных шумов. Тем не менее, даже для сильно зашумленных изображений совместный расчет контраста и резкости при различных значениях дефокусировки может быть положен в основу эффективного алгоритма нахождения изображений с наилучшим качеством.

Заключение

Проведенные исследования дают основание сделать вывод о том, что по отдельности контраст и резкость цифрового изображения не в полной мере характеризуют его качество. Присутствие пространственных шумов на изображениях, содержащих малое количество слабоконтрастных объектов с размытыми границами, превращает количественную оценку качества изображения известными методами в трудноразрешимую проблему. Предложенный в настоящей работе комбинированный подход к количественной оценке контраста и резкости может быть положен в основу эффективной технологии автоматической фокусировки в цифровой микроскопии и системах технического зрения.

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

Литература

1. Вудс Р., Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – V. 8. – № 6. – P. 679–698.
3. Beghdadi A., Le Negrate A. Contrast enhancement technique based on local detection of edges // Computer Vision, Graphics and Image Processing. – 1989. – V. 46. – P. 162–174.
4. Peli E. Contrast in complex images // Journal of the Optical Society of America A. – 1990. – V. 7. – № 1. – P. 2032–2039.
5. Eskicioglu A.M., Fisher P.S. Image quality measures and their performance // IEEE Transactions on Communications. – 1995. – V. 43. – № 12. – P. 2959–2965.
6. Beghdadi A., Khellaf A. A noise-filtering method using a local information measure // IEEE Transactions on Image Processing. – 1997. – V. 6. – № 6. – P. 879–882.
7. Subbarao M., Tyan J.K. Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1998. – V. 20. – P. 864–870.
8. Zhang Y., Zhang Y., Wen C. A new focus measure method using moments // Image and Vision Computing. – 2000. – V. 18. – P. 959–965.
9. Журавель И.М. Краткий курс теории обработки изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 28.09.2011).
10. Kautsky J., Flusser J., Zitova B., Simberova S. A new wavelet-based measure of image focus // Pattern Recognition Letters. – 2002. – V. 23. – P. 1785–1794.
11. Roushdy M. Comparative study of edge detection algorithms applying on the grayscale noisy image using morphological filter // Graphics, Vision and Image Processing Journal. – 2006. – V. 6. – № 4. – P. 17–23.

12. Duncan D.D., Kirkpatrick S.J., Wang R.K. Statistics of local speckle contrast // Journal of the Optical Society of America A. – 2008. – V. 25. – № 1. – P. 9–15.
13. Мониц Ю.И., Старовойтов В.В. Оценки качества для анализа цифровых изображений // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 376–386.
14. Хрящев Д.А. Об одном методе анализа цифрового изображения с применением гистограмм // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – № 1. – P. 109–113.
15. Беззубик В.В., Белашенков Н.Р., Никифоров В.О. Метод количественной оценки контраста цифрового изображения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 6 (70). – С. 86–88.
16. Michelson A.A. Studies in Optics. – Chicago, IL: Univ. of Chicago Press, 1927.

- Беззубик Виталий Вениаминович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник, bezzubik@mail.ru
- Белашенков Николай Романович* – ОАО «ЛМО», кандидат физ.-мат. наук, помощник технического директора, belashenkov@gmail.com
- Никифоров Владимир Олегович* – ОАО «ЛМО», доктор технических наук, профессор, технический директор, nikiforov@mail.ifmo.ru

УДК 004.4'242

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛЬЮ БЕСПИЛОТНОГО САМОЛЕТА НА ОСНОВЕ ОБУЧАЮЩИХ ПРИМЕРОВ

С.В. Казаков, Ф.Н. Царев, А.А. Шалыто

Для управления объектом со сложным поведением предлагается строить систему конечных автоматов, состоящую из автомата верхнего уровня, который необходим для переключения между режимами управления, и автоматов нижнего уровня, каждый из которых обеспечивает управление объектом в одном режиме. Данная работа продолжает тему построения автоматов нижнего уровня с помощью алгоритма генетического программирования на основе обучающих примеров: рассматривается построение автомата верхнего уровня с использованием обучающих примеров и уже построенных автоматов нижнего уровня, при этом генетическое программирование не используется. Приводятся результаты экспериментального исследования предложенного метода.

Ключевые слова: конечные автоматы, беспилотный самолет.

Введение

В настоящее время одной из актуальных задач является задача разработки программного обеспечения для управления объектами со сложным поведением. При этом для некоторых объектов управления такая задача является чрезвычайно сложной и трудно решаемой. Таким объектом может быть, например, транспортное средство (автомобили, самолеты, вертолеты, космические корабли) или другая сложная техника (роботы, техника на производстве).

Рассмотрим подробнее задачу управления беспилотным самолетом. Существует несколько подходов к ее решению. Один из них состоит в выделении «идеальной» траектории из нескольких полетов, выполненных человеком, и последующее следование ей. Такой подход описан в работе [1].

Другой подход – использование конечных автоматов для управления. В современной литературе чаще всего рассматриваются два подхода к управлению с использованием автоматов. В одном из них применяется один автомат, который осуществляет весь процесс управления, во втором – система автоматов, состоящая из головного автомата (автомата верхнего уровня), который необходим для переключения между режимами управления, и автоматов нижнего уровня, каждый из них обеспечивает управление объектом в одном режиме. Головной автомат взаимодействует с автоматами нижнего уровня за счет вложенности.

Построение автоматов нижнего уровня можно производить либо вручную (эвристически) [2], либо, например, с помощью алгоритмов генетического программирования. Некоторые из алгоритмов генетического программирования описаны в работах [3–6].

Автомат верхнего уровня можно построить аналогично. Один из алгоритмов генетического программирования для построения автоматов верхнего уровня описан в работе [7]. В этой работе вычислительные функции приспособленности базировались на моделировании поведения самолета во внешней среде, что для одной особи занимало около пяти минут на двух двухъядерных компьютерах, а для всего процесса – около двух недель, что является существенным недостатком этого подхода. С целью устранения указанного недостатка в работе [8] было предложено использовать обучающие примеры [9] как замену моделированию. Такой подход также основан на генетическом программировании, однако, в отличие от

работы [7], он состоит в построении автоматов нижнего уровня, каждый из которых управляет объектом в одном режиме. При этом построение одного автомата занимало от 5 до 20 часов.

Эффективность использования обучающих примеров для построения автоматов нижнего уровня позволила авторам сделать предположение, что построение головного автомата на основе обучающих примеров также будет весьма эффективно. При этом авторы использовали третий подход к построению головного автомата, состоящий в разработке алгоритма его построения на основе обучающих примеров и уже построенных автоматов нижнего уровня. Вместе с автоматами нижнего уровня также должны быть заданы последовательности значений входных параметров для каждого автомата. Считается, что последовательность параметров для автомата нижнего уровня задает поведение беспилотного самолета под управлением данного автомата.

Подходы с использованием обучающих примеров позволяют при большом их числе избавиться от неточностей, допускаемых человеком при их записи.

Отметим, что используемый в данной работе объект со сложным поведением (беспилотный самолет) в дальнейшем может быть заменен на любой другой объект, который может управляться в нескольких режимах работы.

Взаимодействие беспилотного самолета с иерархической системой автоматов

Схема взаимодействия беспилотного самолета с иерархической системой автоматов приведена на рис. 1.

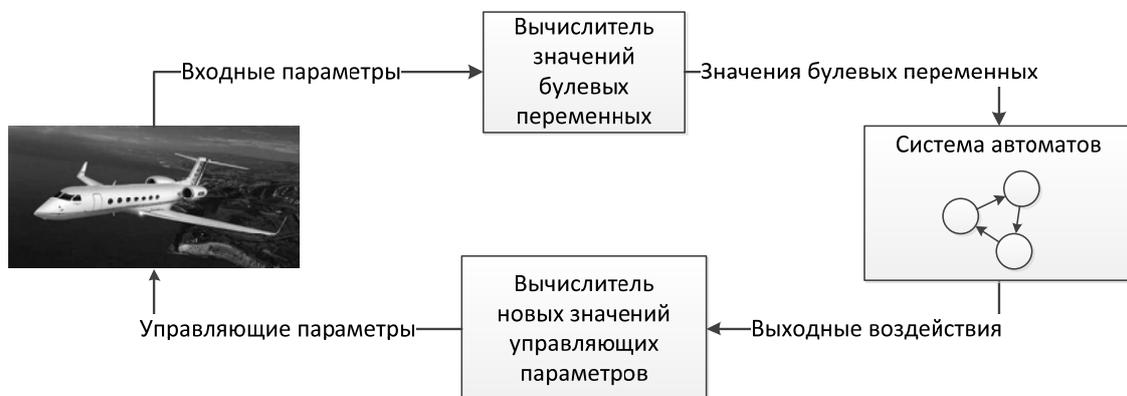


Рис. 1. Схема взаимодействия беспилотного самолета с иерархической системой автоматов

Эта схема, кроме самолета и иерархической системы автоматов, содержит также два вычислительных блока, первый из которых по значениям входных параметров формирует значения всех булевых переменных, используемых в автоматах, а второй по приращениям, формируемым автоматами нижнего уровня, вычисляет значения управляющих параметров.

Структура обучающего примера

Исходными данными для построения головного автомата являются набор обучающих примеров и построенные автоматы нижнего уровня, каждый из которых соответствует одному режиму управления самолетом. Обучающие примеры, задающие эталонное поведение, создаются человеком.

Обучающий пример состоит из двух последовательностей – входных и управляющих параметров. Эти последовательности разделены на фрагменты, соответствующие разным режимам полета самолета. При этом неизвестно, какой из режимов соответствует какому фрагменту последовательности.

Структура автомата верхнего уровня

Будем предполагать, что для каждого режима существует одно состояние автомата. Это состояние реализуется автоматом нижнего уровня. Таким образом, головной автомат содержит столько состояний, сколько используется режимов (сколько имеется автоматов нижнего уровня).

Так как автомат верхнего уровня непосредственно не управляет самолетом, а только обеспечивает переключение между режимами, то на его графе переходов дуги содержат только условия перехода и не содержат воздействий. Для обеспечения переходов будем использовать условия следующего вида: « $[\!:]x_1 \& [\!:]x_2 \& \dots \& [\!:]x_k$ ». Здесь x_i – булевы переменные. Более сложные условия не использовались, так как для рассматриваемой задачи они не требовались, а также потому, что их трудно построить автоматически.

Алгоритм построения автомата верхнего уровня

Предлагаемый алгоритм состоит из двух этапов:

- идентификация режимов в каждом обучающем примере;

- определение дуг между состояниями автомата и условий на них.

Для идентификации режимов каждому фрагменту последовательности обучающего примера необходимо сопоставить автомат нижнего уровня. Это сопоставление осуществляется за счет вычисления редакционного расстояния между двумя последовательностями входных параметров – той последовательности параметров, которая записана в обучающем примере, и последовательности, которая задается вместе с каждым автоматом нижнего уровня. В результате идентификации для каждого фрагмента обучающего примера становится известен режим, соответствующий этому фрагменту.

В ходе выполнения второго этапа по результатам идентификации определяются дуги между состояниями автомата и условия на них. Для этого необходимо для каждых двух соседних фрагментов обучающего примера добавить дугу между состояниями, которые соответствуют этим фрагментам. Для каждой дуги автомата из обучающего примера можно выделить обучающий поднабор, который состоит из нескольких последовательностей входных параметров. Каждая такая последовательность разделена на две части, которые соответствуют выполнению и невыполнению условия перехода. Определение условия перехода выполняется с помощью перебора всех возможных условий указанного вида с проверкой его работоспособности на обучающем поднаборе.

Экспериментальная проверка

Для проверки эффективности и работоспособности предложенного метода была выбрана задача построения системы автоматов, управляющей беспилотным самолетом, который должен взлететь, набрать высоту, далее выполнять команды, которые приходят с Земли, и в конечном итоге приземлиться. При этом возможен приход трех команд:

- выполнить мертвую петлю;
- начать снижаться для того, чтобы приземлиться;
- начать набирать высоту до необходимой для выполнения мертвой петли.

При этом последние две команды могут отменять друг друга, но команду выполнения мертвой петли отменить нельзя, пока она не будет выполнена.

Для записи обучающих примеров и проверки построенной системы автоматов был выбран свободно распространяемый кроссплатформенный симулятор FlightGear (<http://www.flightgear.org>), который применительно к настоящей работе позволяет осуществлять как ручное, так и программное управление моделью самолета.

Построение автоматов нижнего уровня

Управление беспилотным самолетом в рассматриваемой задаче должно осуществляться в следующих режимах: запуск двигателя; разгон; набор высоты (взлет); сбалансированный полет; мертвая петля; снижение; приземление; торможение.

При этом автоматы нижнего уровня были построены следующим образом:

- автомат для выполнения мертвой петли был «выращен» с помощью алгоритма генетического программирования, описанного в работе [8];
- автоматы для всех остальных режимов были построены вручную.

Построение автомата верхнего уровня

Для построения этого автомата было использовано 13 обучающих примеров. Число этих примеров было выбрано эвристически, однако экспериментальная проверка показала, что автомат верхнего уровня, построенный с их использованием, работает корректно. После этого вручную был сформирован набор булевых переменных, которые будут использоваться в автомате верхнего уровня на переходах.

На рис. 2 приведен автомат, построенный с помощью изложенного выше алгоритма. В этом автомате используются следующие булевы переменные:

- x_0 – двигатель работает длительное время (более 0,5 с);
- x_1 – высота меньше нулевого порога;
- x_2 – мертвая петля была выполнена;
- x_3 – пришла команда на выполнение мертвой петли;
- x_4/x_5 – пришла команда начать набирать высоту/снижаться;
- x_6 – скорость относительно земли больше 59 км/ч;
- x_7 – высота больше 1381 футов \approx 400 метров;
- x_8 – прошло 50 с после переключения в данный режим;
- x_9 – прошло 28 с после переключения в данный режим;
- x_{10} – высота больше 196 футов \approx 60 метров.

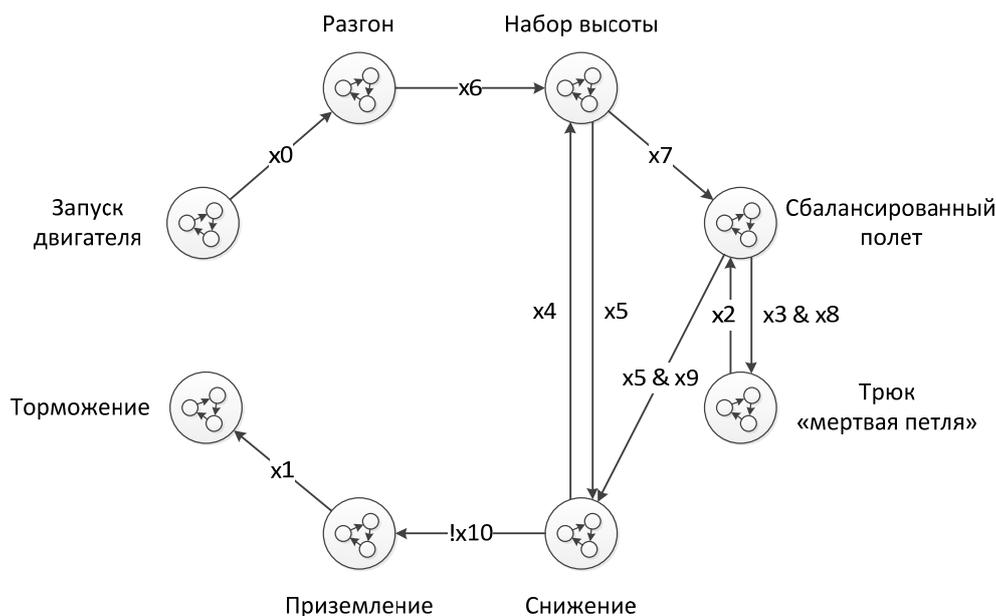


Рис. 2. Построенный автомат верхнего уровня

Оценка эффективности процесса построения автомата верхнего уровня

На основе изложенного выше алгоритма построения автомата верхнего уровня была написана программа на языке Java, которая также обеспечивает взаимодействие с симулятором в соответствии со схемой на рис. 1. Эта программа сначала строит автомат верхнего уровня, а затем обеспечивает реализацию схемы взаимодействия.

Вычисления производились на одном ядре компьютера с процессором Intel Core 2 Duo T7250 с тактовой частотой 2 ГГц под управлением операционной системы Microsoft Windows 7. При этом время построения автомата верхнего уровня составило менее двух минут.

Анализ построенного автомата

Видеозапись одного из полетов самолета под управлением построенной системы автоматов доступна по адресу <http://www.youtube.com/watch?v=dq5AVzqXug0>. Анализ этой видеозаписи показывает, что самолет ведет себя корректно во всех режимах.

В результате многократного наблюдения за полетом самолета в симуляторе не было обнаружено странностей в его поведении. В большинстве случаев полет проходил гладко, без каких-либо больших отклонений от предполагаемой траектории на всех режимах полета. На основании этого был сделан вывод о том, что вся система автоматов была построена корректно.

Заключение

В работе предложен метод построения автомата верхнего уровня на основе обучающих примеров и построенных автоматов нижнего уровня для каждого используемого режима. Благодаря использованию обучающих примеров появилась возможность отказаться от использования моделирования для оценки построенного автомата, что позволило уменьшить время его построения на несколько порядков.

Предложенный метод был апробирован на задаче построения системы автоматов для управления беспилотным самолетом во время выполнения всего процесса полета.

Статья подготовлена в рамках работ 1.6 и 2.10 «Разработка и апробация учебно-методического обеспечения для реализации проектного подхода к обучению студентов путем проведения инициативных научных исследований» проекта «Подготовка и переподготовка профильных специалистов на базе центров образования и разработок в сфере информационных технологий. Лот 1. «Подготовка и переподготовка профильных специалистов на базе центров образования и разработок в сфере информационных технологий в Северо-Западном Федеральном округе».

Литература

1. Coates A., Abbeel P., Ng A. Y. Learning for Control from Multiple Demonstrations // Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning. – Helsinki, 2008. – P. 144 – 151.

2. Paraschenko D., Shalyto A., Tsarev F. Modeling Technology for One Class of Multi-Agent Systems with Automata Based Programming // IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMSA 2006). – Spain, 2006. – P. 15 – 20 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://is.ifmo.ru/science/CIMSA2006-1.pdf>, своб.
3. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2006. – 366 с.
4. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.
5. Koza J. R. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection. – MIT Press, 1992. – 819 p.
6. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Состояние. Проблемы. Перспективы // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1999. – № 1. – С. 144–160.
7. Поликарпова Н.И., Точилин В.Н., Шалыто А.А. Метод сокращенных таблиц для генерации автоматов с большим числом входных переменных на основе генетического программирования // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – № 2. – С. 100–117.
8. Александров А.В., Казаков С.В., Сергушичев А.А., Царев Ф.Н., Шалыто А.А. Применение генетического программирования на основе обучающих примеров для генерации конечных автоматов, управляющих объектами со сложным поведением // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2. – С. 3–11.
9. Царев Ф.Н. Метод построения управляющих конечных автоматов на основе тестовых примеров с помощью генетического программирования // Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 5. – С. 31–36.

Казаков Сергей Владимирович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, магистрант, svkazakov@rain.ifmo.ru

Царев Федор Николаевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, fedor.tsarev@gmail.com

Шалыто Анатолий Абрамович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, shalyto@mail.ifmo.ru

УДК 004.852

РЕГИОНАЛЬНАЯ ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАРКОМАНИИ

С.А. Митягин, Ю.Н. Захаров, А.В. Бухановский, П.М.А. Слоот

Рассматривается региональная математическая модель прогнозирования численности населения и распространения наркомании, предназначенная для изучения структуры, состояния и динамики наркоситуации в целях оперативного анализа и прогноза возможных тенденций ее развития. Параметры модели оцениваются на основе экономического и психологического состояния общества, что позволяет получить долгосрочный прогноз развития наркоситуации при различных сценариях социально-экономического развития региона.

Ключевые слова: наркоситуация, марковская модель, мониторинг, демографическая ситуация, сценарий развития.

Введение

Мониторинг и анализ наркоситуации на данный момент являются одними из самых актуальных вопросов государственной антинаркотической политики и деятельности по противодействию незаконному обороту наркотиков и распространению наркомании [1–3]. Специфика исследований в данной области заключается в скрытом и криминальном характере процесса распространения наркомании, который недоступен для непосредственного наблюдения. Данные особенности требуют применения комплексных методов оценки и анализа наркоситуации, основанных на наблюдении процессов, характеризующих уровень развития наркомании на рассматриваемой территории. Таким образом, существует необходимость разработки аппарата математического моделирования рассматриваемых процессов с учетом причинно-следственных связей между наркоманией и отображаемыми ею факторами [4]. Решение данной задачи позволяет прогнозировать развитие наркоситуации в зависимости от общей социальной, экономической, психологической и политической обстановки на территории, что, в свою очередь, является важнейшей составляющей планирования работ по противодействию незаконному обороту наркотиков и развитию наркомании. В настоящей работе рассматривается подход к моделированию распространения наркомании на основе региональной демографической модели для Санкт-Петербурга.

Математическая модель динамики наркоситуации

Одним из подходов к моделированию социальных процессов является применение демографических матричных моделей, действие которых основано на предсказании будущей возрастной структуры объекта прогнозирования по известной структуре в настоящий момент времени и коэффициентам вероятности перехода [5, 6]. Традиционной областью применения матричных моделей является прогнозирование половозрастной структуры населения на основе данных о рождаемости и смертности в регионе [7].

В литературе выделяют следующие группы населения в социальной структуре незаконного оборота наркотиков [8, 9]: население, имеющее иммунитет к наркомании (*I*); население, входящее в группу риска (*S*); наркозависимые, состоящие на учете с диагнозом синдрома зависимости от наркотических веществ (*Y*); лица, принимающие психоактивные вещества и не состоящие под наблюдением (*X*); распространители наркотических веществ (*D*). Это позволяет рассмотреть структуру состояний процесса распространения наркомании (рис. 1).

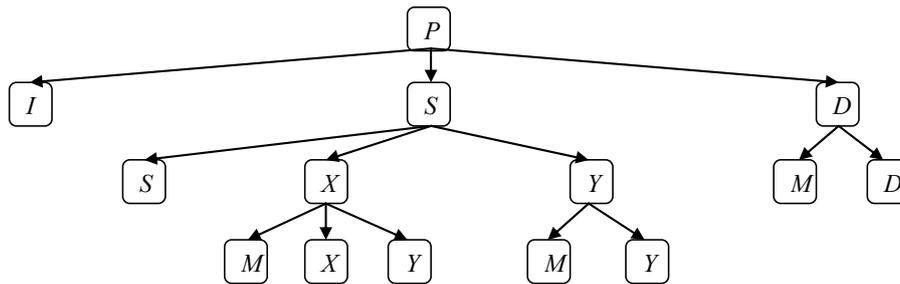


Рис. 1. Структура состояний процесса распространения наркомании

Помимо вышеуказанных обозначений на схеме приведены: общее население территории (*P*); лица, к которым применена мера наказания в виде лишения свободы (*M*). Сложность рассматриваемой модели обусловлена скрытым характером наркомании, включающим достаточно существенную латентную составляющую [10, 11], что требует комплексного подхода к оценке данного явления.

Описание переходов между состояниями рассматривается в терминах цепи Маркова. Динамика ее интегральных характеристик записывается в виде матричного уравнения

$$P_{i+1} = F_1 P_i + W_i, \tag{1}$$

где W_i – сальдо миграции в период i ; F_1 – матрица следующей структуры:

$$F_1 = \begin{pmatrix} f_{b1} & f_{b2} & \dots & f_{bn} \\ f_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & f_{n-1} \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где первая строка содержит вероятности рождения ребенка у лиц каждого возраста, а на диагонали – вероятности лиц каждого возраста $(0, \dots, n-1)$ дожить до следующего возраста.

Детализация состояний по группам населения выполняется на основе ряда закономерностей.

1. Динамика населения с иммунитетом к наркомании

$$I_{i+1} = F_2 I_i + F_3 P_i, \tag{3}$$

где F_2 – матрица структуры (2) для группы населения I ; F_3 – диагональная матрица, элементами которой являются вероятности перехода населения каждого возраста в группу I .

2. Динамика лиц, состоящих на учете с диагнозом синдрома зависимости от наркотических веществ,

$$Y_{i+1} = F_4 Y_i + F_5 P_i - F_6 Y_i, \tag{4}$$

где F_4 – матрица структуры (2) для группы населения Y ; F_5 – диагональная матрица, элементами которой являются вероятности перехода населения каждого возраста в группу Y ; F_6 – диагональная матрица, элементами которой являются вероятности быть привлеченными к уголовной ответственности для лиц из группы Y .

3. Динамика лиц, принимающих психоактивные вещества и не состоящих на учете

$$X_{i+1} = F_7 X_i + F_8 P_i - F_9 X_i - F_{10} X_i, \tag{5}$$

где F_7 – матрица структуры (2) для группы населения X ; F_8 – диагональная матрица, элементами которой являются вероятности перехода населения каждого возраста в группу X ; F_9 – диагональная матрица, элементами которой являются вероятности быть привлеченными к уголовной ответственности для лиц из группы X ; F_{10} – диагональная матрица, элементами которой являются вероятности встать на учет как наркозависимые для лиц из группы X .

4. Динамика лиц, распространяющих наркотические вещества,

$$D_{i+1} = F_{11}D_i + F_{12}P_i - F_{13}D_i, \quad (6)$$

где F_{11} – матрица структуры (2) для группы населения D ; F_{12} – диагональная матрица, элементами которой являются вероятности перехода населения каждого возраста в группу D , F_{13} – диагональная матрица, элементами которой являются вероятности для лиц из группы D быть привлеченными к уголовной ответственности.

Модель (1)–(6) зависит от матриц параметров F_1 – F_{13} , состоящих из переходных вероятностей между группами населения; их параметры получаются на основе экспертных оценок или путем обработки демографических данных по региону.

Оценка параметров модели

Рассмотрим формирование элементов управляющих матриц F_1 – F_{13} на основе факторов, характеризующих развитие наркомании. При построении прогноза структуры наркопотребителей учитываются два взаимосвязанных процесса – демографическое развитие населения и распространение наркомании на территории, которые характеризуют воспроизводство населения на территории и наркотизацию общества. Данные процессы являются взаимосвязанными, так как на них влияют общие группы факторов. В частности, в работах [11, 12] рассматривается оценивание процесса наркотизации на основе социально-демографических индикаторов самоощущения неблагополучия, которые характеризуют поведенческие и демографические реакции населения на неблагополучие. Среди таких индикаторов выделяются:

- уровень безработицы (I_1);
- уровень заработных плат (I_2);
- концентрация доходов населения – индекс Джини (I_3);
- число зарегистрированных браков (I_4);
- число зарегистрированных разводов (I_5);
- число родившихся за период (I_6);
- число умерших за период (I_7);
- число преступлений, совершенных несовершеннолетними (I_8);
- процент населения, удовлетворенного жизнью (I_9);
- процент населения, ясно видящего перспективы в жизни (I_{10}).

Некоторые из перечисленных показателей в значительной степени коррелируют между собой.

Корреляционный анализ структуры показателей I_1 – I_{10} свидетельствует о наличии групп факторов, совместно влияющих на уровень заболеваемости наркоманией. С целью снижения мерности и выявления групп факторов, оказывающих наибольшее влияние на ситуацию, используем метод главных компонент. В таблице приведены значения двух первых естественных ортогональных составляющих (около 90% изменчивости) для данных I_1 – I_{10} по Санкт-Петербургу.

| Главные компоненты | I_1 | I_2 | I_3 | I_4 | I_5 | I_6 | I_7 | I_8 | I_9 | I_{10} |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| P_1 | 0,16 | 0,35 | –0,33 | 0,33 | 0,25 | 0,33 | 0,34 | 0,31 | –0,36 | 0,34 |
| P_2 | 0,66 | –0,18 | –0,23 | –0,26 | 0,52 | –0,29 | –0,08 | 0,15 | 0,11 | 0,15 |

Таблица. Естественные ортогональные составляющие системы показателей I_1, \dots, I_{10}

Рассмотрим зависимость вероятности заболевания наркоманией от оценок величин главных компонент P_1 , P_2 посредством применения регрессионной модели

$$f_i = \theta_1 P_{1i} + \theta_2 P_{2i} + \theta_3 + \varepsilon_i, \quad (7)$$

где f_i – вероятность перехода в группу населения, употребляющего наркотики; $\theta_1, \dots, \theta_3$ – параметры регрессии; $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^T$ – нормально распределенная ошибка с нулевым средним и дисперсией $D\varepsilon = \sigma^2 E$; E – единичная матрица. Вероятности f_i в регрессионной модели (7) оцениваются непосредственно по данным социальной статистики как

$$f_i = \frac{y_i}{s_i}, \quad (8)$$

где y_i – численность впервые зарегистрированных наркозависимых соответствующего возраста за период; s_i – численность группы риска соответствующего возраста.

Таким образом, матрица оценок вероятностей перехода в группу населения, употребляющего наркотики, имеет вид

$$F_{5,i} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ f_i^1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & f_i^2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_i^{n-1} & 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где f_i^j – оценки вероятностей перехода в группу наркопотребителей лиц в возрасте j за период i , которые вычисляются согласно выражению (7) на основе априорной информации о факторах I_1-I_{10} . Структура матрицы F_8 оценивается аналогичным образом с учетом коэффициента латентности.

На рис. 2 приведены точечные оценки (8) вероятностей перехода в группу наркопотребителей для лиц группы риска и их аппроксимации регрессией (7). На приведенных графиках рассмотрены основные, наиболее характерные возрасты (16, 19, 25 и 35 лет).

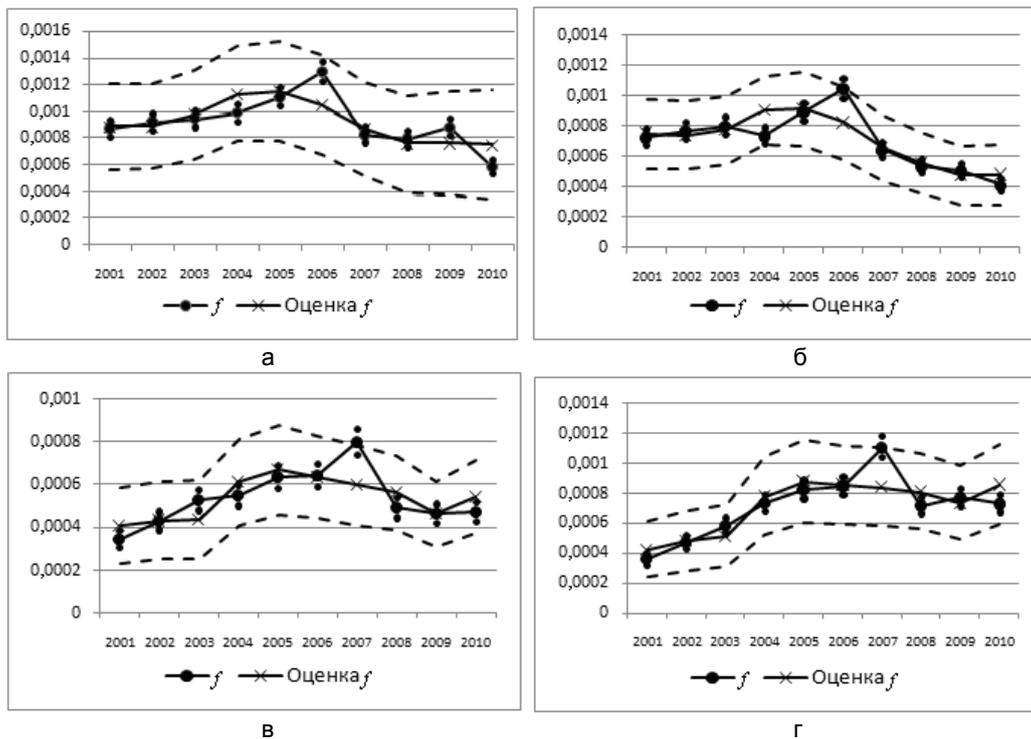


Рис. 2. Динамика вероятностей перехода в группу наркопотребителей для лиц группы риска в возрасте 15 лет (а); 18 лет (б); 25 лет (в); 35 лет (г). Данные по Санкт-Петербургу

На основе рис. 2 можно сделать вывод о том, что модель (7)–(9) достаточно точно описывает процесс развития наркомании; при этом отклонения регрессии от точечных оценок вероятности лежат в 95% доверительном интервале для точечной оценки (8), что демонстрирует достаточность использования только первых двух главных компонент показателей I_1-I_{10} . Значения элементов остальных управляющих матриц определяются на основе показателей государственной статистики.

Прогнозирование развития наркоситуации

Оценка параметров модели (1)–(6) посредством применения уравнений регрессии (7)–(9) позволяет получить долгосрочный прогноз развития наркоситуации на основе прогноза показателей I_1-I_{10} и оценочных значений главных компонент P_1, P_2 , что, в свою очередь, позволяет наблюдать различные варианты прогноза масштабов наркопотребления в зависимости сценария социально-экономического развития территории. Рассмотрим демографическую структуру населения города Санкт-Петербурга в 2001, 2004, 2007 и 2010 г.г. (рис. 3).

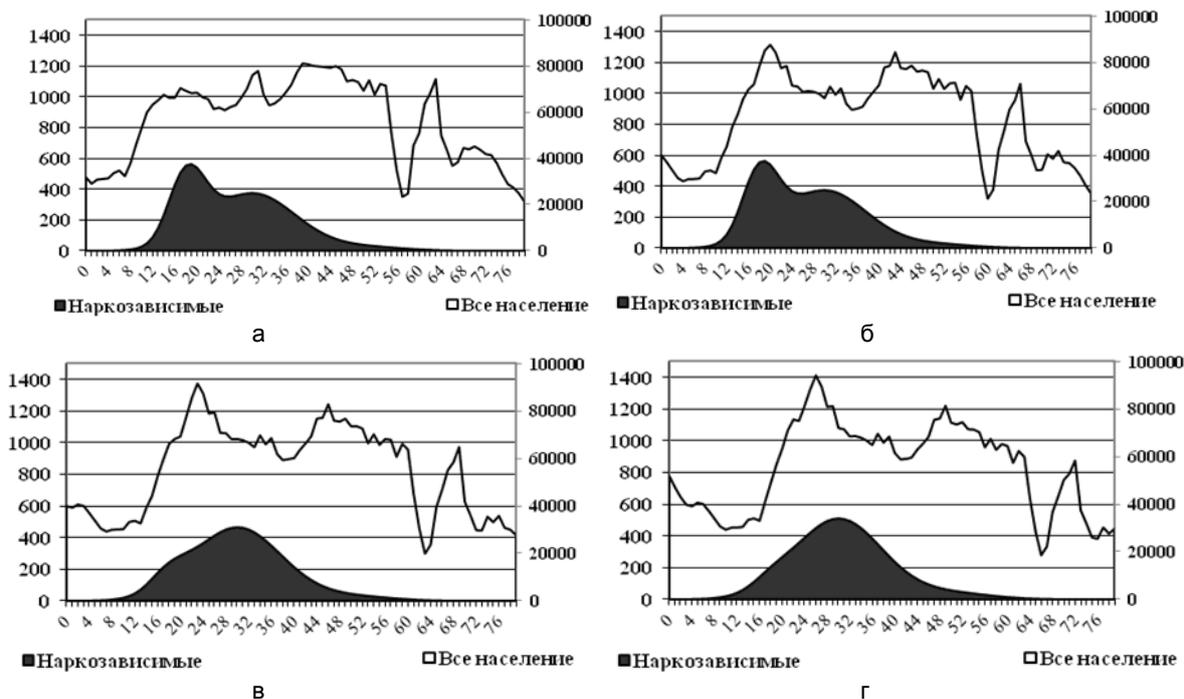
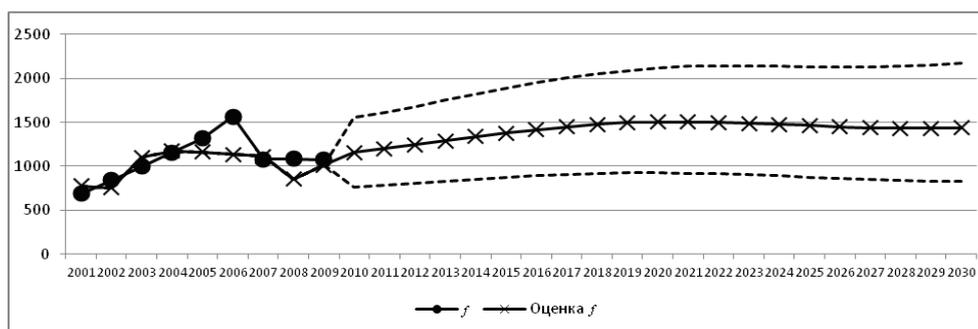
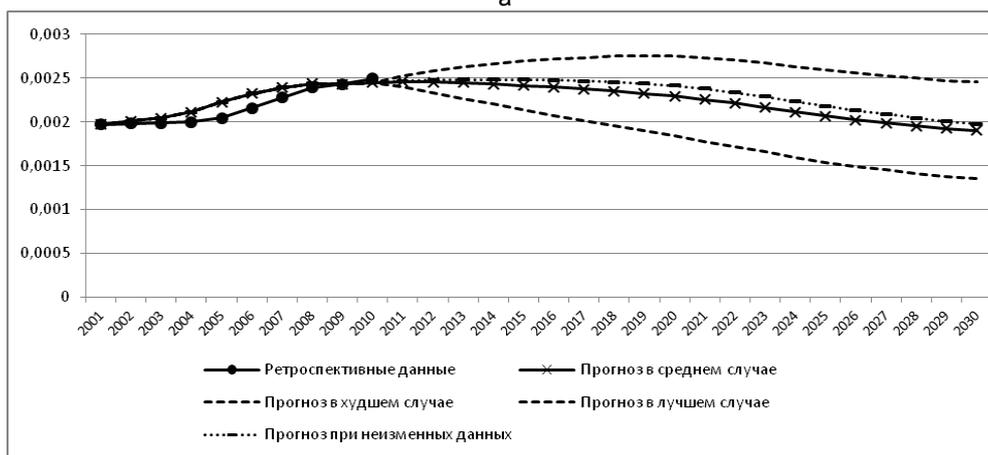


Рис. 3. Возрастная структура населения в г. Санкт-Петербурге: в 2001 году (а); в 2004 году (б); в 2007 году (в); в 2010 году (г)



а



б

Рис. 4. Прогноз развития наркоситуации в Санкт-Петербурге: появление новых наркоманов (а); доля наркозависимых в структуре населения региона (б)

На рис. 3 можно наблюдать наличие значительного спада численности населения в возрасте 8–18 лет и пик численности населения в возрасте 25–35 – наиболее неблагоприятном с точки зрения заболеваемости наркоманией. При этом видно, что пик количества наркозависимых постепенно сдвигается в сторону больших возрастов. Это связано как со снижением рождаемости в постперестроечный период, так и с позитивным эффектом антинаркотических мероприятий: видно, что основу группы наркозависимых

мых составляют люди, ставшие наркоманами в 90-х г.г. XX века. С целью получения долгосрочного прогноза развития наркоситуации на территории, как было отмечено выше, необходимо осуществить прогнозирование показателей I_1-I_{10} . На рис. 4 приведен результат прогнозирования заболеваемости наркоманией в г. Санкт-Петербурге при средних значениях прогноза показателей I_1-I_{10} .

Заключение

Полученные результаты прогноза развития наркомании иллюстрируют возможность применения модели (1)–(6) для анализа наркоситуации на территориях отдельных регионов. На основе полученных результатов можно сделать выводы о структуре и численности наркозависимых в регионе. Так предположительно, в 2011 г. численность наркозависимых в Санкт-Петербурге достигнет максимального значения, затем начнется некоторый спад регистрации новых наркоманов и снижение доли наркозависимых в общей структуре населения. Полученный эффект можно объяснить резким снижением численности населения в возрасте 8–18 лет, а именно тех лиц, которые в 2012–2014 г.г. составят большую часть группы риска по наркомании, чем объясняется снижение числа новых наркоманов. С другой стороны, население в возрасте 45–50 лет сместится в область вне группы риска, поскольку в меньшей степени будет подвержена наркотизации. Следует отметить, что использование данной модели требует учета миграции, значение которой в большой степени зависит от внешней политики. В силу этого необходимо осуществлять коррекцию параметров модели с целью увеличения достоверности прогноза.

Работа выполнена в рамках реализации постановления № 220 Правительства Российской Федерации при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы».

Литература

1. Указ Президента РФ «Об утверждении Стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года» от 12.05.2009 № 537.
2. Указ Президента РФ «Об утверждении Стратегии государственной антинаркотической политики Российской Федерации до 2020 года» от 09.06.2010 № 690.
3. Постановление Правительства РФ «Об утверждении Положения о государственной системе мониторинга наркоситуации в Российской Федерации» от 20.06.2011 № 485.
4. Яковлев С.В., Гнусов Ю.В. Анализ и прогнозирование показателей наркологической статистики в Украине и в Харьковской области // Молодежь и наркотики (социология наркотизма) / Под ред. В.А. Соболева, И.П. Рущенко. – Харьков: Торсинг, 2000. – С. 194–221.
5. Аристов С.А. Имитационное моделирование экономических систем: Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал.гос.экон.ун-та, 2004. – 124 с.
6. Цыбагов В.А. Модели производственного потенциала для долгосрочного прогнозирования регионального развития // Методология регионального прогнозирования. – М.: СОПС, 2003. – С. 114–127.
7. Муравей Л.А. Экология и безопасность жизнедеятельности. – М.: Юнити-Дана, 2000. – 445 с.
8. Боев Б.В. Современные этапы математического моделирования процессов развития и распространения инфекционных заболеваний // Эпидемиологическая кибернетика: модели, информация, эксперименты. – М., 1991. – С. 6–13.
9. Боев Б.В., Бондаренко В.М. Прогностическая модель распространения наркомании и ВИЧ-инфекции среди молодежи // Микробиология. – 2001. – № 5. – С. 76–81.
10. Стародубов В.И., Татаркин А.И. Влияние наркомании на социально-экономическое развитие общества. – УрО РАН, 2006. – 381 с.
11. Татаркин А.И., Куклин А.А. Комплексная методика диагностики качества жизни в регионе. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2010. – 136 с.
12. Мартынов А.С., Артюхов В.В., Виноградов В.Г. Окружающая среда и здоровье населения России. 1998.

Митягин Сергей Александрович

– Санкт-Петербургское государственное унитарное предприятие «Санкт-Петербургский информационно-аналитический центр», ведущий специалист-аналитик, Mityagin@iac.spb.ru

Захаров Юрий Никитович

– Санкт-Петербургское государственное унитарное предприятие «Санкт-Петербургский информационно-аналитический центр», кандидат технических наук, профессор, директор, zaharov@iac.spb.ru

Бухановский Александр Валерьевич

– НИИ НКТ, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, директор, avb_mail@mail.ru

Слоот Петрус Мария Арнольдус

– Университет г. Амстердам, доктор философии, профессор, p.m.a.sloot@uva.nl

УДК 681.3

НАДЕЖНОСТЬ ДУБЛИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В.А. Богатырев, С.А. Башкова, В.Ф. Беззубов, А.В. Полякова, Е.Ю. Котельникова, И.Ю. Голубев

Предложена марковская модель надежности восстанавливаемого дублированного вычислительного комплекса, функционирующего в режиме разделения нагрузки, оценены коэффициент сохранения эффективности, стационарный и нестационарный коэффициенты готовности.

Ключевые слова: отказоустойчивость, дублированный комплекс, разделение нагрузки, надежность, коэффициент сохранения эффективности.

Введение

Обеспечение высокой надежности управляющих компьютерных систем требует введения избыточности [1–3], поэтому в таких системах в качестве базовых вычислительных средств используются дублированные вычислительные комплексы, зачастую объединяемые в кластеры [4–9]. В системах компьютерного управления дублированные комплексы функционируют либо в режиме параллельной работы, (каждый запрос направляется на обслуживание в два полукомплекса, результаты вычислений сравниваются), что повышает достоверность работы, либо в режиме разделения нагрузки, что позволяет повысить производительность, но может привести к потере результатов вычислений.

Структура дублированного комплекса

Рассмотрим дублированный (двухмашинный) комплекс (рис. 1), каждый из полукомплексов которого включает процессор (P) и модуль памяти (M), реконфигурация системы осуществляется с использованием переключателя (S). В режиме разделения нагрузки по мере накопления отказов при реконфигурации возможен переход (деградация) от распределения запросов на обслуживание в два полукомплекса до их обслуживания одним полукомплексом, возможно, формируемым из исправного оборудования разных полукомплексов.

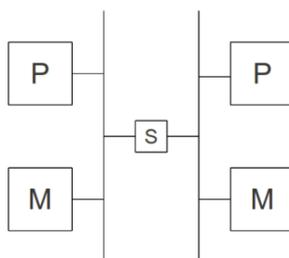


Рис. 1. Дублированный комплекс

Марковская модель надежности дублированного комплекса

При построении марковской модели надежности восстанавливаемого комплекса в режиме разделения нагрузки будем считать, что известны интенсивности отказов $\lambda_p, \lambda_m, \lambda_s$ и восстановлений μ_p, μ_m, μ_s процессоров P, памяти M и переключателя S, причем восстановление проводится одним ремонтником после любого отказа.

Граф переходов для марковской модели надежности исследуемой системы приведен на рис. 2, на котором отказавшие узлы затемнены. Решение дифференциальных уравнений, составленных по графу переходов по рис. 2, позволяет найти вероятности всех состояний комплекса и в результате суммирования работоспособных состояний определить нестационарный коэффициент готовности (функцию готовности) комплекса [1]. Решение системы дифференциальных уравнений проведено в системе компьютерной математики Mathcad-14 по методу Рунге-Куты. Представление системы дифференциальных уравнений в Mathcad-14 по графу рис. 2 приведено на рис. 3, а результат ее решения отражен на рис. 4, а. Для нахождения стационарного коэффициента готовности комплекса составим систему алгебраических уравнений (приравнивая производные в правой части нулю). Результаты решения системы алгебраических уравнений представлены матрицей на рис. 4, б, при $\lambda_p=0,0001, \lambda_m=0,0003, \lambda_s=0,0002$ 1/ч; $\mu_p=0,5, \mu_m=0,5, \mu_s=0,5$ 1/ч. Суммируя найденные вероятности работоспособных состояний, вычисляем коэффициент готовности (стационарный) комплекса.

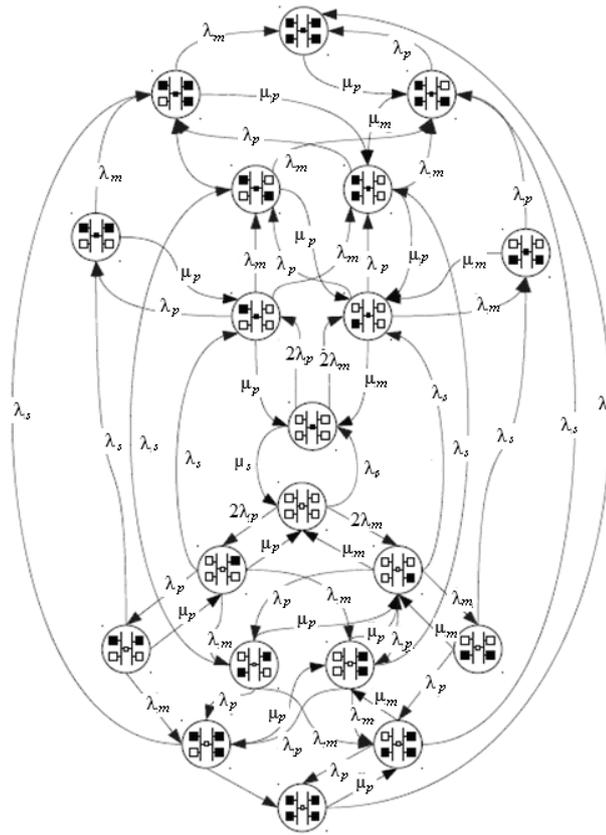


Рис. 2. Граф переходов для марковской модели надежности системы

$$P := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} D(t, P) := \begin{bmatrix} -P0\lambda_s - 2P0\lambda_p - 2P0\lambda_m + P1\mu_p + P2\mu_p + P3\mu_m \\ -2P1\lambda_p - 2P1\lambda_m - P1\mu_s + P0\lambda_s + P4\mu_p + P5\mu_m \\ P2\mu_p - P2\lambda_p - 2(P2\lambda_m) - 2P\lambda_s + 2P0\lambda_p + P9\mu_p \\ P3\mu_m - P3\lambda_m - 2(P3\lambda_p) - P3\lambda_s + 2P0\lambda_m + P6\mu_p + P7\mu_p + P8\mu_m \\ P4\mu_p - P4\lambda_p - 2P4\lambda_m + 2P1\lambda_p + P2\lambda_s + P12\mu_p \\ -P5\mu_m - P5\lambda_m - 2P5\lambda_p + 2P1\lambda_m + P3\lambda_s + P10\mu_p + P11\mu_m + P13\mu_p \\ P6\mu_p - P6\lambda_p - P6\lambda_s - P6\lambda_m + P2\lambda_m + P3\lambda_p + P14\mu_m + P15\mu_p \\ -P7\mu_p - P7\lambda_p - P7\lambda_s - P7\lambda_m + P2\lambda_m + P3\lambda_p \\ -P8\mu_m - P8\lambda_s - P8\lambda_p + P3\lambda_m \\ -P9\mu_p - P9\lambda_s - P9\lambda_m + P2\lambda_p \\ -P10\mu_p - P10\lambda_p - P10\lambda_m + P4\lambda_m + P5\lambda_p + P7\lambda_s \\ -P11\mu_m - P11\lambda_p + P5\lambda_m + P8\lambda_s = 0 \\ -P12\mu_p - P12\lambda_m + P4\lambda_p + P9\lambda_s \\ -P13\mu_p - P13\lambda_m - P13\lambda_p + P4\lambda_m + P5\lambda_p + P6\lambda_s + P16\mu_m + P17\mu_p \\ -P14\mu_m - P14\lambda_p - P14\lambda_s + P6\lambda_m + P7\lambda_m + P8\lambda_p + P18\mu_p \\ -P15\mu_p - P15\lambda_m - P15\lambda_s + P6\lambda_p + P7\lambda_p + P9\lambda_m \\ -P16\mu_m - P16\lambda_p + P10\lambda_m + P11\lambda_p + P13\lambda_m + P14\lambda_s + P19\mu_p \\ -P17\mu_p - P17\lambda_m + P10\lambda_p + P12\lambda_m + P13\lambda_p + P15\lambda_s \\ -P18\mu_p - P18\lambda_s + P14\lambda_p + P15\lambda_m \\ -P19\mu_p + P16\lambda_p + P17\lambda_m + P18\lambda_s \end{bmatrix}$$

Z := tfixd(P, 0, 100, 1000, D) n := 0...1000

Рис. 3. Задание системы дифференциальных уравнений в Mathcad-14

Оценка коэффициента сохранения эффективности

Представляя каждый полукomплекс системой массового обслуживания типа M/M/1 [10], для работоспособных состояний системы найдем среднее время пребывания запросов.

Для исходного состояния (при отсутствии отказов) поток запросов распределяется на обслуживание в два полукomплекса и среднее время пребывания запросов в системе вычисляется как

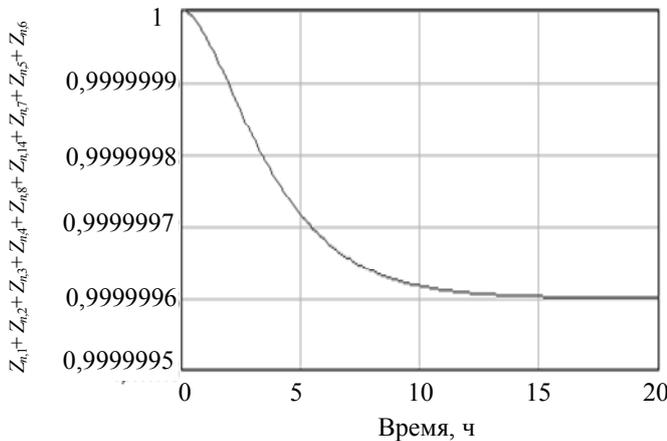
$$T_0 = \frac{v}{1 - \lambda v / 2},$$

где λ – интенсивность потока запросов, а v – среднее время их выполнения.

Для состояний с обслуживанием запросов в одном полукомплексе (например, при отказе процессора какого-либо полукомплекса) среднее время пребывания запросов равно

$$T_1 = \frac{v}{1 - \lambda v}.$$

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|-----|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,1 | 0,99991222 | 601963·10 ⁻⁵ | 065864·10 ⁻⁵ | 133824·10 ⁻⁵ | 34776·10 ⁻¹⁰ | 067583·10 ⁻⁹ | 87976·10 ⁻¹⁰ |
| 2 | 0,2 | 0,99982872 | 893475·10 ⁻⁵ | 586805·10 ⁻⁵ | 182331·10 ⁻⁵ | 554384·10 ⁻⁹ | 113963·10 ⁻⁹ | 701513·10 ⁻⁹ |
| 3 | 0,3 | 0,99974931 | 576014·10 ⁻⁵ | 029958·10 ⁻⁵ | 408023·10 ⁻⁴ | 821091·10 ⁻⁹ | 660258·10 ⁻⁹ | 876261·10 ⁻⁹ |
| 4 | 0,4 | 0,99967377 | 731659·10 ⁻⁴ | 839595·10 ⁻⁵ | 497164·10 ⁻⁴ | 883137·10 ⁻⁹ | 181026·10 ⁻⁸ | 578827·10 ⁻⁹ |
| 5 | 0,5 | 0,99960192 | 674946·10 ⁻⁴ | 443824·10 ⁻⁵ | 893615·10 ⁻⁴ | 152951·10 ⁻⁸ | 314686·10 ⁻⁸ | ... |



```

0,9982007609993440199
0,00059963935218896958591
0,00039872201391551783793
0,00079840000369433181198
4,7875368772067563261e-7
9,5970912426926184222e-7
3,1926391953536490116e-7
3,1878626278972582657e-7
3,191047177035698689e-7
7,9664738045058509076e-8
5,7437043535474527027e-10
5,7523143404303805062e-10
1,4349218349777112352e-10
5,758057315047124605e-10
3,1891331866586790336e-10
1,593166150679735756e-10
7,6669435203323783931e-13
3,8286892824048794574e-13
1,2743285005033281123e-13
3,829461517330424329e-16
    
```

а

б

Рис. 4. Результат решения системы дифференциальных (а) и алгебраических уравнений (б) в системе компьютерной математики Mathcad-14

Для состояний с отказом модуля памяти одного полукомплекса и работы двух процессоров с одним модулем памяти (подключенным к одному процессору непосредственно через магистраль, а ко второму – через переключатель) среднее время пребывания запросов найдем как

$$T_3 = \frac{\pi v}{1 - \pi \lambda v} + \frac{(1 - \pi) v \delta}{1 - (1 - \pi) \lambda v \delta},$$

где π – доля запросов, направляемых в полукомплекс с исправным процессором и памятью, а $(1 - \pi)$ – в полукомплекс с отказом модуля памяти; δ – коэффициент, учитывающий замедление вычислений для процессора, работающего с памятью через переключатель (процессор, работающий с памятью своего полукомплекса, имеет больший приоритет).

Определив вероятности P_i всех N работоспособных состояний системы и вычислив нормированную эффективность i -го состояния относительно исходного состояния (без отказов), найдем коэффициент сохранения эффективности комплекса как

$$k_{сэ} = \sum_{i=0}^N \frac{T_0}{T_i} P_i.$$

Проведем расчет коэффициента сохранения эффективности при $\lambda_p=0,0001$, $\lambda_m=0,0003$, $\lambda_s=0,0002$ 1/ч; $\mu_p=0,5$, $\mu_m=0,5$, $\mu_s=0,5$ 1/ч. Результаты расчета коэффициента сохранения эффективности системы от интенсивности запросов представлены на рис. 5. На рис. 5, а, при $\pi=0,5$ кривые 1–3 соответствуют $\delta=1$; 1,5; 2. На рис. 5, б, при $\delta=2$ кривые 1–4 соответствуют $\pi=0,5$; 0,6; 0,7; 0,8.

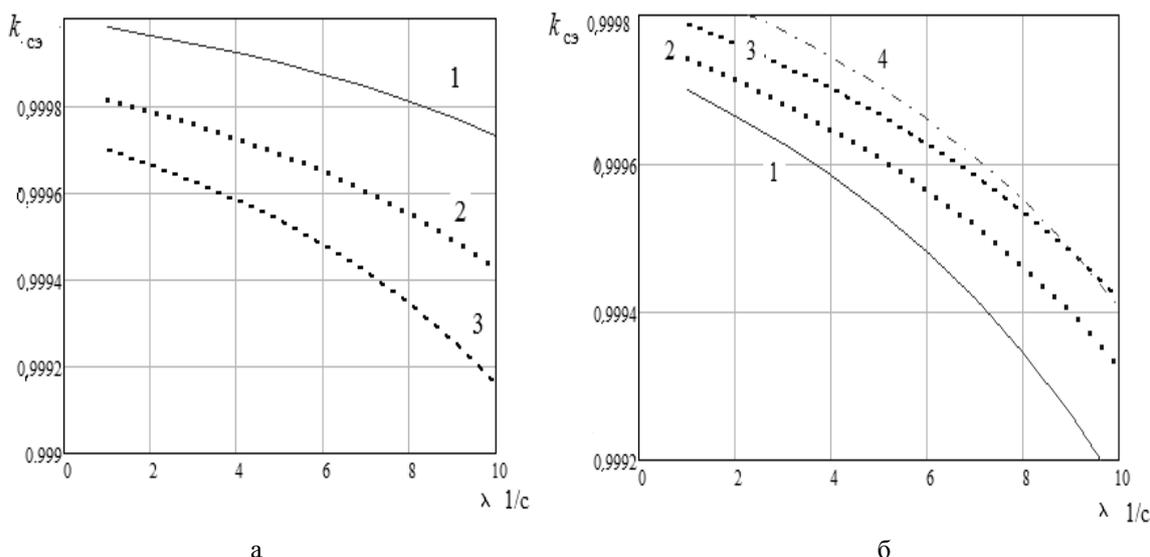


Рис. 5. Коэффициент сохранения эффективности системы: кривые 1–3 соответствуют $\delta=1; 1,5; 2$ при $\pi=0,5$ (а); кривые 1–4 соответствуют $\pi=0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ при $\delta=2$ (б)

Представленные зависимости показывают существенность влияния организации связи через адаптер (переключатель) на эффективность вычислительного процесса при накоплении отказов. Таким образом, для восстанавливаемых дублированных комплексов представляется целесообразным исследование вариантов организации межмашинной взаимосвязи и их влияния на отказоустойчивость вычислительного процесса.

Заключение

Таким образом, предложена марковская модель надежности восстанавливаемого дублированного вычислительного комплекса, позволяющая определить стационарный и нестационарный коэффициент готовности комплекса и оценить влияние накопления отказов на снижение эффективности системы.

Для восстанавливаемых дублированных комплексов показано влияние на эффективность вычислительного процесса распределения нагрузки при накоплении отказов. Таким образом, представляется целесообразным исследование вариантов организации межмашинной взаимосвязи и их влияния на отказоустойчивость вычислительного процесса, а также решение задачи оптимизации распределения нагрузки в частично работоспособных комплексах.

Литература

1. Половко А.М. Основы теории надежности. – СПб: БХВ Петербург, 2006. – 704 с.
2. Панфилов И.В., Половко А.М. Вычислительные системы. – М.: Советское радио, 1980. – 304 с.
3. Шубинский И.Б., Николаев В.И., Колганов С.К., Заяц А.М. Активная защита от отказов управляющих модульных вычислительных систем. – СПб: Наука, 1993. – 285 с.
4. Богатырев В.А. Отказоустойчивые многомашинные вычислительные системы динамического распределения запросов при дублировании функциональных ресурсов // Изв. вузов. Приборостроение. – 1996. – № 4. – С. 81–84.
5. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Анализ готовности многоуровневой коммуникационной подсистемы компьютерных систем кластерной архитектуры // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 1. – С. 88–94.
6. Богатырев В.А. Оптимальное резервирование системы разнородных серверов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 12. – С. 30–36.
7. Богатырев В.А. К анализу сохранения эффективности вычислительных систем с функциональной деградацией модулей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2000. – № 12. – С. 68–70.
8. Богатырев В.А. Отказоустойчивость вычислительных систем с функциональной реконфигурацией // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 11. – С. 51–53.
9. Богатырев В.А. Оценка вероятности безотказной работы функционально-распределенных вычислительных систем при иерархической структуре узлов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – № 3. – С. 67–70.
10. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

- Богатырев Владимир Анатольевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Башкова Светлана Андреевна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, sveta.bashkova@gmail.com
- Беззубов Владимир Федорович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, bezzubov-vf@yandex.ru
- Полякова Анастасия Вячеславовна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, axel.denielt@gmail.com
- Котельникова Елена Юрьевна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, elka842@yandex.ru
- Голубев Иван Юрьевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, golubev@mail.ru

УДК 004.315.5

БЫСТРЫЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ ПО ОСНОВАНИЮ 4

А.С. Румянцев

Разработан одноктактовый блок нормализации делителя и делимого, занимающий немногим большую площадь по сравнению с последовательными (многотактовыми) блоками нормализации. Предложен метод определения ситуации переполнения при целочисленном знаковом и беззнаковом делении, позволяющий минимизировать площадь, занимаемую аппаратными ресурсами, и снизить их энергопотребление. Приведено сравнение различных архитектурных вариантов конвейеризации устройства делителя по основанию 4, которые используют разработанный одноктактовый блок нормализации и предложенный метод определения ситуации переполнения.

Ключевые слова: целочисленное деление по основанию 4, нормализация делителя и делимого, переполнение при целочисленном знаковом и беззнаковом делении.

Введение

Целочисленное деление является одной из наиболее затратных операций в современных процессорах, так как деление обладает самым длительным временем выполнения среди всех базовых целочисленных арифметических операций [1]. Хотя операция деления встречается не так часто, как операции сложения и умножения, есть множество важных областей, которые используют эту операцию: системы рендеринга, искусственный интеллект, алгоритмы сжатия данных и т.д. [2]. Наиболее часто используется деление на основе повторов [3], так как деление на основе последовательного приближения [4] в большинстве случаев предполагает использование одноктактового умножителя или даже нескольких одноктактовых умножителей. Использование большего основания при делении на основе повторов является очевидным способом ускорения операции деления [5], но этот подход увеличивает сложность аппаратной реализации и, как следствие, приводит к увеличению занимаемой площади, энергопотреблению и соотношения цена/производительность. На сегодняшний день представлено множество подходов к реализации деления на больших основаниях [6], но некоторые аспекты реализации все еще остаются не до конца исследованными, например, эффективный по площади и энергопотреблению метод определения ситуации переполнения при делении.

В настоящей работе разработан одноктактовый блок нормализации делимого и делителя и предложен метод определения ситуации переполнения при делении для использования в каноническом устройстве делителя для 64/32-, 32/16- и 16/8-битных беззнаковых и знаковых целых чисел по основанию 4 (radix-4) [2, 3]. Разработанный блок нормализации позволяет выполнять нормализацию делимого и делителя за один такт, занимая при этом небольшую площадь в сравнении с последовательными блоками нормализации [7]. Предлагаемый метод определения ситуации переполнения при делении позволяет минимизировать площадь, занимаемую аппаратными ресурсами, и снизить их энергопотребление по сравнению с широко используемым на данный момент стандартным подходом [2, 6]. Кроме того, в работе приведено сравнение различных вариантов конвейеризации устройства делителя по основанию 4. Все рассмотренные варианты реализации устройства деления были верифицированы на корректность и синтезированы на библиотеку элементов TSMC LP120a 40 нм с использованием Synopsys DC и ICC.

Однотактовый блок нормализации делимого и делителя

Блок нормализации является одним из самых низкоскоростных блоков в критических путях устройств деления [3]. При использовании последовательных блоков нормализации среднее время нормализации будет значительным [7], но занимаемая площадь окажется минимальной. Разработанный блок нормализации является однотактовым, занимает небольшую площадь по сравнению с последовательным блоком нормализации и позволяет определить случай равенства делителя нулю.

Пусть x, d, q, rem обозначают делимое, делитель, частное и остаток от деления соответственно:

$$x = q * d + rem. \tag{1}$$

В формуле (1) и в последующих формулах знак «*» означает скалярное умножение, если не оговорено иное.

При реализации делителя на основе повторов с использованием таблицы выбора цифры частного необходимо, чтобы делимое и делитель были нормализованы [7]. Для нормализации произвольных делимых и делителей необходимо определить значение коэффициента нормализации ζ для получения нормализованного делителя ($d * \zeta$). Тогда, после нормализации делителя и делимого, (1) приобретет вид

$$x * \zeta = q * (d * \zeta) + rem * \zeta, |rem * \zeta| \leq |d * \zeta| - \zeta. \tag{2}$$

Основными задачами блока нормализации являются:

- нахождение позиции ведущей «1» в делителе;
- сдвиг делителя влево на определенную величину, чтобы ведущая «1» оказалась в позиции наибольшего значащего бита (2). Делимое сдвигается на соответствующую величину.

Архитектура разработанного однотактового блока нормализации с определением равенства нулю делителя показана на рис. 1 для 64-битного делимого и 32-битного делителя.

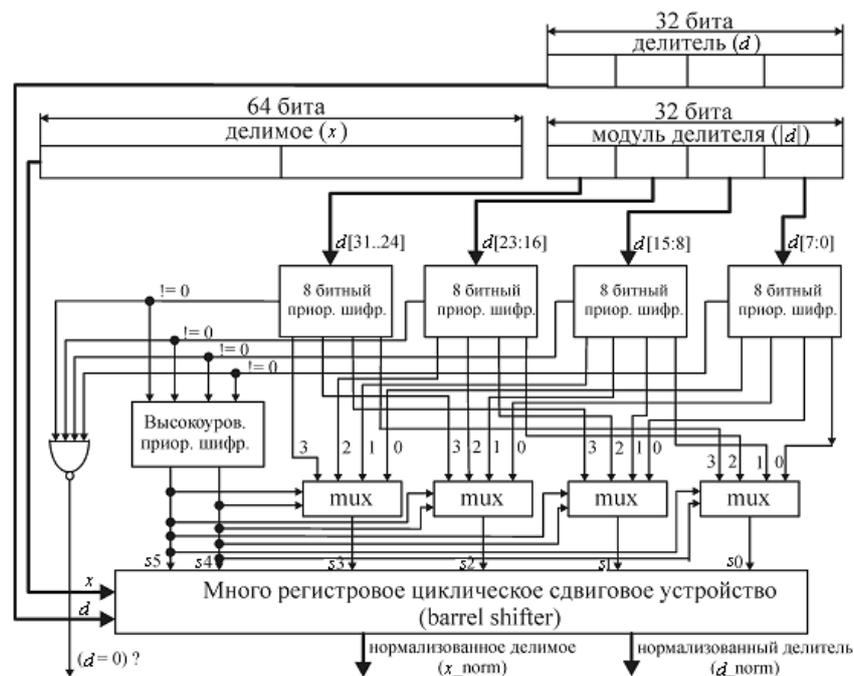


Рис. 1. Архитектура однотактового блока нормализации с определением равенства нулю делителя

Метод определения ситуации переполнения при делении

В рассматриваемом в работе делителе делимое ($2N$) больше частного (N) в два раза. При этом делитель обладает двумя режимами работы:

- беззнаковое деление: $0 < x \leq 2^{2n} - 1; 0 < d \leq 2^n - 1$;
- знаковое деление: $-2^{2n-1} \leq x \leq 2^{2n-1} - 1; -2^{n-1} \leq d \leq 2^{n-1} - 1$.

Довольно часто деление двух операндов, делимого и делителя, приводит к ситуации переполнения. В общем случае, с учетом беззнакового и знакового делений, переполнение происходит в следующих случаях.

1. Делитель d равен нулю. Заметим, что данная ситуация определяется в разработанном блоке нормализации делимого и делителя.
2. Частное q и/или остаток rem выходят за следующие диапазоны:

– при беззнаковом делении

$$0 < q \leq 2^n - 1; \tag{3}$$

$$0 < rem \leq d - 1; \tag{4}$$

– при знаковом делении

$$-2^{n-1} \leq q \leq 2^{n-1} - 1; \tag{5}$$

$$-|d| + 1 \leq rem \leq |d| - 1. \tag{6}$$

Воспользовавшись формулами (1), (3–6), можно перейти к стандартному принципу определения ситуации переполнения при делении беззнаковых и знаковых чисел [2, 6].

1. Делитель d равен нулю.

2. Не выполняются следующие условия:

– при беззнаковом делении $x < d * 2^n$

$$\begin{cases} |x| < |d| * 2^{n-1}, sign(x) = sign(d); \\ |x| < |d| * 2^{n-1} + |d|, sign(x) \neq sign(d). \end{cases}$$

Рассмотренный выше вариант определения ситуации переполнения при делении имеет серьезные недостатки, которые значительно увеличивают занимаемую аппаратными ресурсами площадь и критический путь устройства делителя:

- необходимость получения модуля делимого x , который в разработанном устройстве деления может достигать размера в 64 бита;
- сравнение абсолютного значения делимого по отношению к абсолютному значению сдвинутого делителя. В разработанном устройстве деления для этого потребуется использование полнофункционального 64-битного сумматора;
- при несовпадении знаков делимого и делителя необходимо будет сравнить абсолютное значение делимого и суммы абсолютного значения сдвинутого делителя с его абсолютным значением. В некоторых ситуациях для этого потребуется использование полнофункционального 32-битного сумматора.

В разработанном методе при делении используется иной подход к определению ситуации переполнения, в котором отсутствуют приведенные недостатки. Делимое x разделяется на две части Y и Z , положение которых зависит от типа деления: беззнаковое или знаковое (рис. 2).



Рис. 2. Разделение делимого на две части (Y и Z)

В дальнейшем, в зависимости от знаков делимого x и делителя d , определяется ситуация переполнения:

$$x \geq 0, d \geq 0 \rightarrow K = Y - d$$

1. $\begin{cases} K < 0, \text{нет переполнения} \\ K \geq 0, \text{переполнение} \end{cases}$

$$x < 0, d \geq 0 \rightarrow K = \text{инвертирование}(Y) - d$$

2. $\begin{cases} K < 0, \text{нет переполнения} \\ K = 0, \text{специальный случай.} \\ K > 0, \text{переполнение} \end{cases}$
Специальный случай: $\begin{cases} Z + d > 0, \text{нет переполнения} \\ Z + d \leq 0, \text{переполнение} \end{cases}$

$$x \geq 0, d < 0 \rightarrow K = Y + d$$

$$3. \begin{cases} K < 0, \text{нет переполнения} \\ K = 0, \text{специальный случай. Специальный случай} : \begin{cases} Z + d < 0, \text{нет переполнения} \\ Z + d \geq 0, \text{переполнение} \end{cases} \\ K > 0, \text{переполнение} \end{cases}$$

$$x < 0, d < 0 \rightarrow K = Y - d$$

$$4. \begin{cases} K > 0, \text{нет переполнения} \\ K = 0, \text{специальный случай. Специальный случай} : \begin{cases} Z \neq 0, \text{нет переполнения} \\ Z = 0, \text{переполнение} \end{cases} \\ K < 0, \text{переполнение} \end{cases}$$

На рис. 3 показана зависимость площади и потребляемой мощности от частоты тактирования устройства делителя на 40 нм LP120a в библиотеке элементов TSMC для стандартного метода и предложенного метода определения ситуации переполнения при делении.

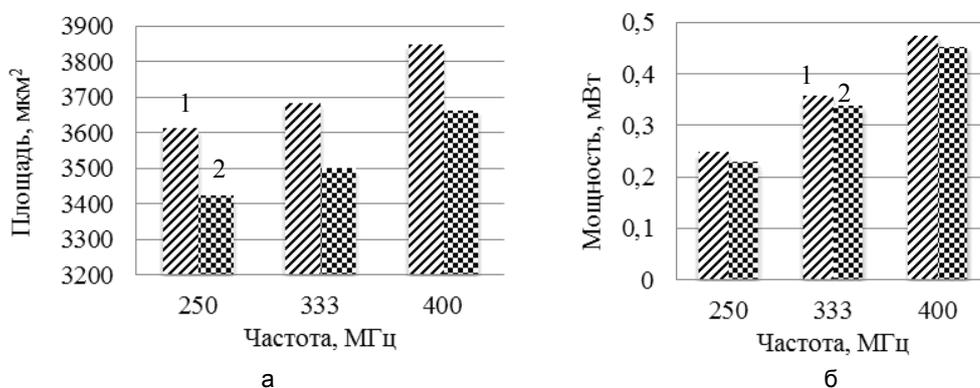


Рис. 3. Зависимость площади (а) и потребляемой мощности (б) делителя от частоты тактирования: 1 – стандартный метод, 2 – разработанный метод

Как видно из рис. 3, аппаратная реализация предложенного метода определения ситуации переполнения оказывается лучше, чем стандартный подход, занимая в среднем на 5,1% меньше площади и потребляя в среднем на 7,8% меньше мощности.

Анализ воздействия конвейеризации на устройство делителя

На рис. 4 приведена функциональная блок-схема последовательности стадий работы рассматриваемого устройства делителя.

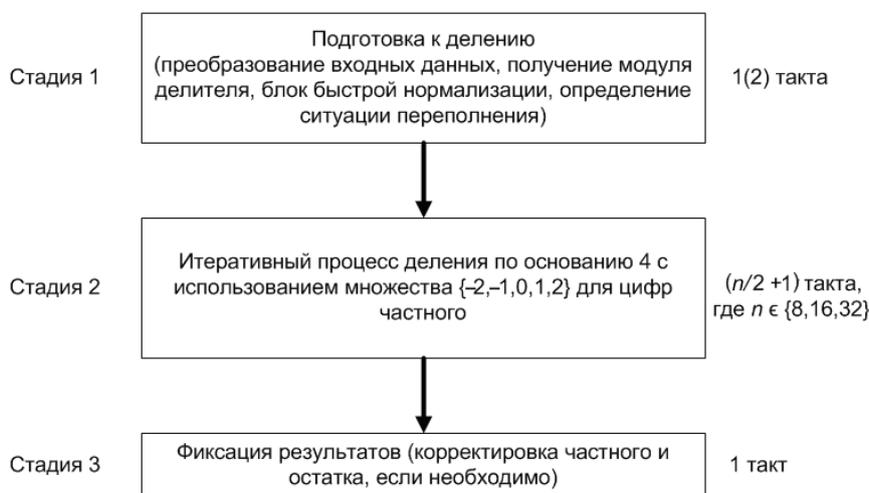


Рис. 4. Функциональная блок-схема стадий работы разработанного устройства деления

Рассмотрим различные варианты конвейеризации стадий устройства деления.

1. Стадия 1 занимает два такта, а стадия 3 – один такт.
2. Стадия 1 и стадия 3 занимают один такт.
3. Стадия 1 занимает 1 такт, а стадия 3 комбинационно объединяется со стадией 2.
4. Стадии 1 и 3 объединяются комбинационно вместе со стадией 2.

На рис. 5 показана зависимость площади и потребляемой мощности от частоты тактирования устройства делителя на 40 нм LP120a в библиотеке элементов TSMC для различных вариантов конвейеризации. Рис. 6 отображает время деления чисел разной разрядности на различных вариантах исполнения устройства деления.

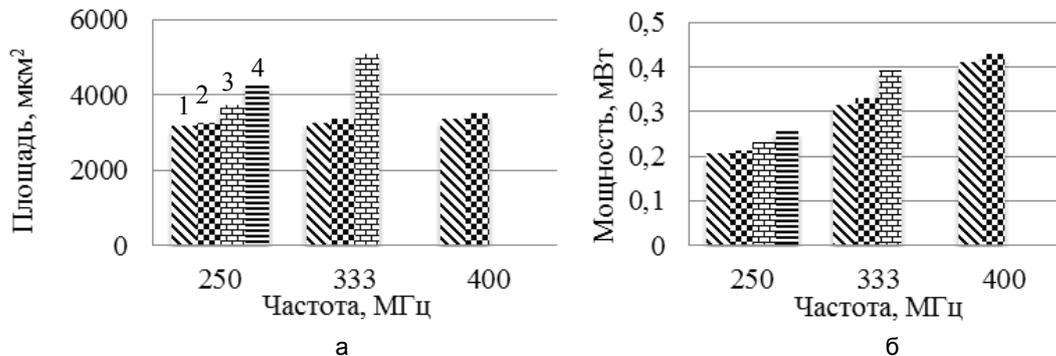


Рис. 5. Зависимость площади (а) и потребляемой мощности (б) от частоты тактирования делителя: 1 – вариант №1; 2 – вариант №2; 3 – вариант №3; 4 – вариант № 4

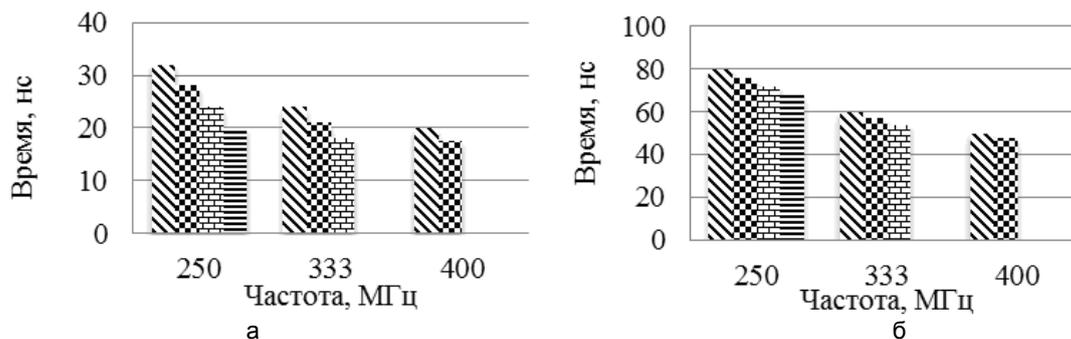


Рис. 6. Зависимость времени деления 16 на 8-битные числа (а) и 64 на 32-битные числа (б) от частоты (обозначения те же)

Из рис. 5, 6 видно, что чем более конвейеризованным становится устройство делителя, тем оно с повышением частоты занимает меньшую площадь, потребляет меньшую мощность и укладывается в ограничения целевой библиотеки элементов. Однако при этом возрастает количество тактов, необходимое для завершения операции деления. С позиций эффективности по занимаемой площади, энергопотреблению и возможности масштабирования частоты тактирования вариант № 2 конвейеризации устройства делителя выглядит более предпочтительным.

Заключение

В работе представлены новые подходы к реализации отдельных подсистем быстрого последовательного целочисленного делителя по основанию 4: однотактового блока нормализации делимого и делителя и блока определения ситуации переполнения. Разработанный блок нормализации делимого и делителя позволяет выполнять нормализацию и определение ситуации равенства нулю делителя за один такт, позволяя уменьшить время выполнения операции деления на 16% и увеличивая занимаемую площадь на 1,7% по сравнению с использованием последовательных блоков нормализации [7]. Результаты синтеза показывают, что аппаратная реализация предложенного метода определения ситуации переполнения при делении позволяет в среднем уменьшить занимаемую площадь на 5,1% и потребляемую мощность на 7,8% по сравнению с широко используемым стандартным подходом [2, 6].

Кроме того, был проведен анализ зависимости степени конвейеризации устройства делителя, использующего предложенные подходы, от занимаемой площади и потребляемой мощности. На основе произведенного сравнения можно осуществлять выбор варианта исполнения устройства деления в зависимости от производительности операции деления и планируемой частоты тактирования.

Литература

1. Intel Corp. Intel® 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual // Intel Press. – 2010. – V. 1. – 540 с.
2. Omondi R. Computer Arithmetic Systems. – Prentice Hall, 1994. – 520 с.
3. Ercegovac M.D. and T. Lang. Division and square root-digit-recurrence algorithms and implementations. – Kluwer Academic Publishers, 1994. – 230 с.
4. Hwang K. Computer arithmetic: principles, architectures, and designs. – John Wiley & Sons. – 1979. – 250 с.
5. Carter T.M. and J.E. Robertson. Radix-16 signed-digit division // IEEE Trans. Computers. – 1990. – V. 12. – № 39. – С. 1424–1433.
6. Ercegovac M.D. and P. Montuschi Very high radix division with prescaling and selection by rounding // IEEE Trans. Computers. – 1994. – V. 6. – № 43. – С. 909–917.
7. Hayes J.P. Computer architecture and organization. – McGraw-Hill, 1988. – 502 с.

Румянцев Александр Сергеевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, dark-streamray@gmail.com

УДК 535.35

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ И ДЕФЕКТАЦИЯ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ВОЗДУШНОГО СУДНА С ПРИМЕНЕНИЕМ
СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ****П.В. Павлов, Н.В. Петров, А.Н. Малов**

Исследован метод спекл-структур оптического излучения с применением спиральных пучков лазерного излучения как средство определения параметров шероховатости и дефектации поверхности оптически непрозрачных деталей воздушного судна. Получены графики зависимости величины интервала корреляции регистрируемых спекл-картин от высотных параметров шероховатости и глубины дефекта контролируемой поверхности. В ходе численного моделирования установлено и экспериментально показано, что использование в качестве зондирующего спирального волнового фронта повышает чувствительность метода спекл-структур.

Ключевые слова: шероховатость, дефектоскопия, спекл, корреляция, спиральные пучки, лазер.

Введение

В настоящее время контроль состояния оптически непрозрачных поверхностей авиационных деталей на этапах подготовки авиационной техники к полетам осуществляется при помощи оптико-визуального метода, результат измерений которого зависит от возможностей человеческого зрения. Таким образом, необходимо повысить эффективность использования оптических методов неразрушающего контроля (НК) поверхностей авиационных деталей для максимального снижения влияния субъективных оценок на результаты контроля с целью повышения безопасности полетов воздушных судов (ВС).

Решению этой проблемы способствуют развитие современной элементной базы микроэлектроники – полупроводниковых лазерных диодов (способных заменить существующие газовые лазеры), матричных фотоприемников, а также возможность реализации различных алгоритмов обработки изображений на портативных ЭВМ. Сочетание данных элементов и средств позволяет создать мобильные, автономные и портативные средства диагностики, позволяющие выполнять весь перечень мероприятий по НК оптически непрозрачных поверхностей авиационных деталей на высоком технологическом уровне.

Для решения рассматриваемой проблемы используются методики корреляционной интерферометрии, в частности, метод спекл-структур оптического излучения (МССОИ) [1]. Регистрируемые спекл-структуры несут информацию о рассеивающих свойствах объектов, поэтому исследование их статистических параметров актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Этим исследованиям посвящены работы [2–4], в которых отражена проблематика анализа спекл-картин для определения параметров шероховатости и дефектации поверхностей деталей с использованием плоских или сферических зондирующих волновых фронтов.

Для расширения функциональных возможностей МССОИ предлагается применить сложноструктурированные пучки, что возможно при использовании дифракционных оптических элементов (ДОО) со сложным профилем зон, которые позволяют формировать лазерные пучки с распределением интенсивности в виде заданной кривой, сохраняющие при распространении свою поперечную структуру с точностью до масштаба и вращения. Такие лазерные пучки с фазовой сингулярностью получили название спиральных, им посвящены многочисленные исследования и публикации российских ученых-оптиков и их зарубежных коллег [5–7], однако инженерно-технические аспекты их применения пока не разработаны, за исключением задач манипулирования микрообъектами [8, 9].

Таким образом, исследование метода спекл-структур, полученных от спиральных пучков лазерного излучения, для задач дефектоскопии элементов ВС является актуальным. Целью настоящей работы была предварительная оценка возможностей диагностики и дефектоскопии при использовании спиральных зондирующих лазерных пучков.

Моделирование процесса определения параметров шероховатости и дефектации поверхности контролируемой детали при зондировании спиральным волновым фронтом лазерного излучения

Моделирование проводилось на основании разработанной математической модели процесса зондирования контролируемой поверхности спиральным пучком лазерного излучения [10]. Для определения параметров шероховатости и дефектации поверхности контролируемой детали использовался корреляционный анализ регистрируемых спекл-картин. Оценка высотных параметров шероховатости производилась путем определения автокорреляционной функции распределения интенсивности поля в плоскости наблюдения (радиуса корреляции) (1):

$$\rho(a) = \overline{(I - \bar{I}_x) \cdot (I - \bar{I}_{x+a})}. \quad (1)$$

При проведении численных исследований была выявлена важная особенность, характеризующая зависимость величины функции автокорреляции распределения интенсивности поля спирального пучка в плоскости регистрации от параметров шероховатости и размеров дефекта, расположенного на контролируемой поверхности: если параметр шероховатости Ra и размеры дефектов a, b, c (ширина, длина, глубина) увеличиваются, то ширина функции автокорреляции уменьшается, и наоборот (рис. 1).

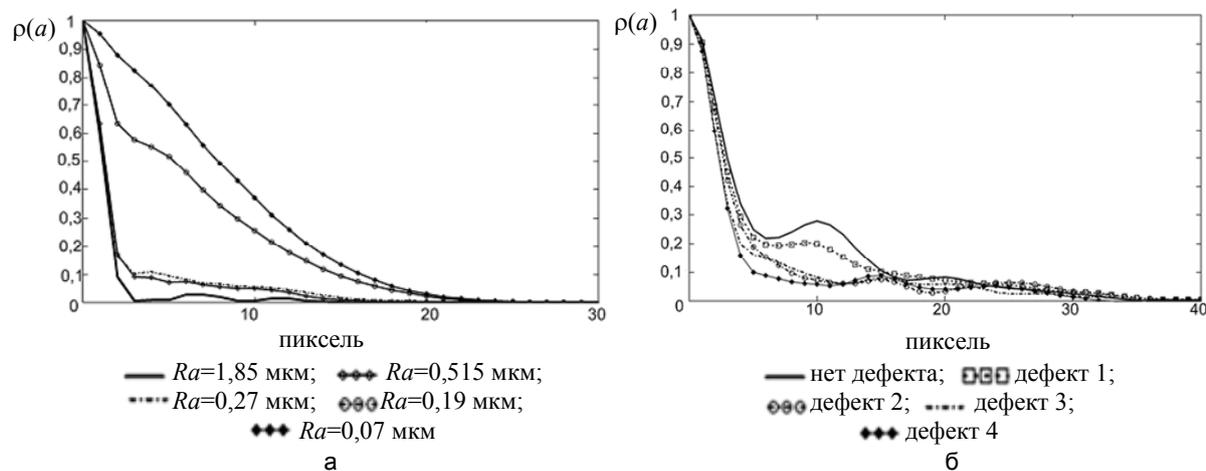


Рис. 1. Результаты моделирования: характеристика зависимости функции автокорреляции (радиус корреляции) спекл-картин от параметров шероховатости Ra (а); характеристика зависимости интервала корреляции спекл-картин от параметров дефекта при условии, что $a_1, b_1, c_1 < a_2, b_2, c_2 < a_3, b_3, c_3 < a_4, b_4, c_4$ (б)

Экспериментальное исследование процесса зондирования контролируемой поверхности плоским и спиральным волновым фронтом лазерного излучения

Для формирования спиральных пучков лазерного излучения использовался фазовый ДООЭ. Внешний вид и схема экспериментальной установки, на которой был реализован процесс зондирования исследуемого объекта, представлен на рис. 2.

В качестве источника когерентного излучения применялся He-Ne лазер ГН-40 с длиной волны $\lambda=630$ нм и мощностью 40 мВт. Регистрирующим элементом выступала ПЗС-матрица от камеры видеонаблюдения ACE-S560CHB с разрешением 640×480 пикселей, позволяющая регистрировать черно-белые изображения. Расстояние от контролируемой поверхности до плоскости наблюдения составляло 22 см.

Для исследования были выбраны следующие объекты:

1. Заготовка в виде металлического параллелепипеда, каждая грань которого была предварительно обработана шлифовальным аппаратом с разными параметрами зернистости и измерены параметры шероховатости при помощи профилометра тип 296.
2. Лопатка авиационного двигателя (АД).

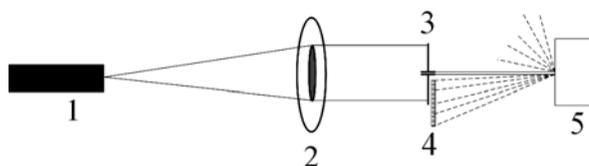
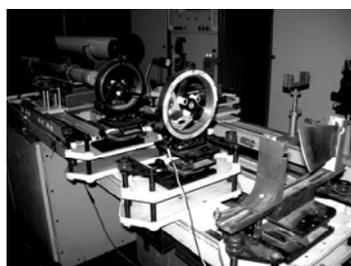


Рис. 2. Внешний вид и схема установки, используемой в эксперименте: 1 – лазер ГН-40; 2 – ДООЭ; 3 – диафрагма; 4 – ПЗС-матрица; 5 – контролируемый объект (металлический параллелепипед, лопатка АД)

С целью оценки степени повышения информативности МССОИ за счет замены плоского пучка на спиральный в ходе работы каждая из поверхностей металлического параллелепипеда подвергалась зондированию сначала плоским волновым фронтом, затем спиральным. Часть рассеянного излучения фиксировалась матрицей ПЗС-приемника и передавалась в виде цифрового изображения на компьютер, где

записывалось в виде матрицы действительных значений интенсивности (спекл-картин), далее проводилась корреляционная обработка регистрируемых спекл-картин.

В результате корреляционной обработки определялась функция автокорреляции и энергетический спектр поля регистрируемых спекл-картин. Результаты вычислений представлены на рис. 3.

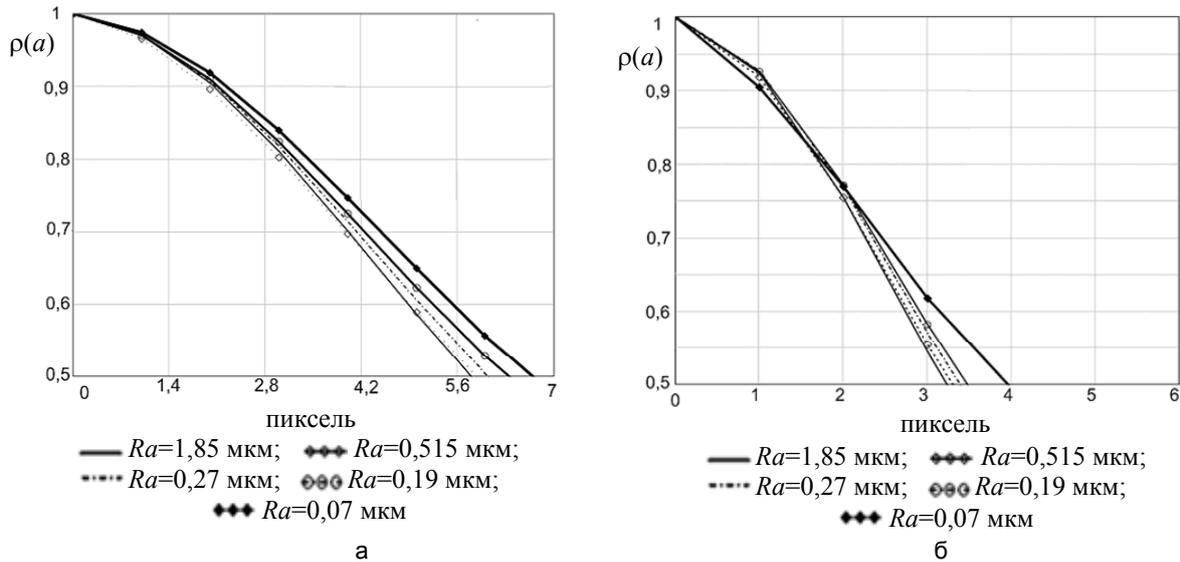


Рис. 3. Результаты корреляционного анализа: зависимость величины функции автокорреляции (радиус корреляции) спекл-картин, регистрируемых при зондировании: плоским (а) и спиральным (б) волновым фронтом лазерного излучения от параметров шероховатости Ra

В ходе эксперимента было установлено, что при зондировании контролируемой поверхности плоским и спиральным волновым фронтом величина функции автокорреляции спекл-картины, регистрируемой в процессе зондирования от каждой грани параллелепипеда, непосредственно зависит от параметра ее шероховатости Ra , что отчетливо наблюдается на графиках функции автокорреляции (рис. 3), чем больше Ra , тем ширина функции автокорреляции (радиус корреляции) спекл-картины меньше, и наоборот. Во второй части эксперимента в качестве контролируемого объекта выступала лопатка АД, входная кромка которой исследовалась. На поверхности исследуемого образца находилось две забоины с параметрами: 1 – ширина 0,5 мм, глубина 0,8 мм; 2 – ширина 0,8 мм, глубина 1 мм.

Результаты корреляционного анализа регистрируемых спекл-картин при контроле кромки лопатки АД представлены на рис. 4, на которых видно, что величина функции автокорреляции (радиус корреляции) напрямую зависит от размеров дефектов, находящихся на поверхности кромки лопатки АД: чем больше глубина и ширина повреждения, тем уже функция автокорреляции, и наоборот.

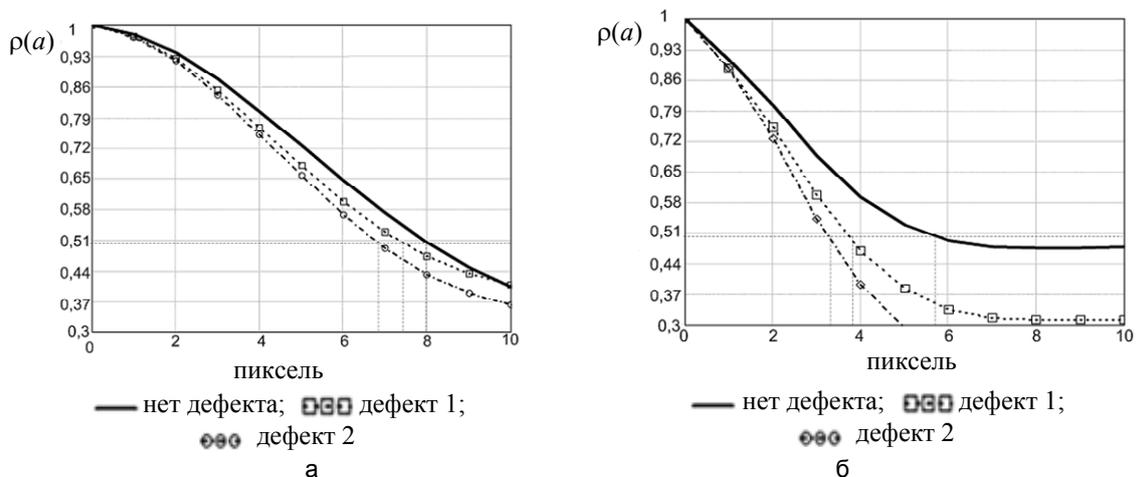


Рис. 4. Результаты корреляционного анализа: зависимость величины функции автокорреляции (радиуса корреляции) спекл-картин, зарегистрированных при зондировании кромки лопатки АД плоским (а) и спиральным (б) волновым фронтом лазерного излучения

При оценке эффективности метода НК важнейшим параметром является его чувствительность. Для оценки чувствительности на этом интервале можно использовать прирост сигнала при изменении

шероховатости на 0,1 мкм. Для оценки чувствительности системы можно использовать величину интервала корреляции спекл-картин (2), зарегистрированных при измерении параметров шероховатости исследуемого металлического параллелепипеда,

$$r_k = \frac{\int_0^{\infty} R(r) dr}{R(0)}. \quad (2)$$

Эксперимент показал (рис. 5, а), что при использовании зондирующего спирального волнового фронта по сравнению с плоским волновым фронтом на интервале от начала координат до величины шероховатости 0,3 мкм угол наклона кривой к горизонтальной оси возрастает. Следовательно, прирост сигнала на единицу изменения шероховатости растет, что говорит о возможности повышения чувствительности системы.

В ходе выполненных расчетов установлено, что при использовании в качестве зондируемого волнового фронта спирального на участках измерения параметров шероховатости $Ra < 0,3$ мкм чувствительность системы возрастает на 40%, что позволяет расширить диапазон измерения параметров Ra и тем самым увеличить точность системы.

Определение эффективности использования спирального волнового фронта по отношению к плоскому, как и ранее, осуществлялось путем оценивания чувствительности диагностической системы. Видно, что чем больше разница между функциями автокорреляции спекл-картины, полученными от неповрежденной и дефектной поверхности, тем чувствительность системы выше, следовательно, вероятность обнаружения дефектов с наименьшими параметрами возрастает.

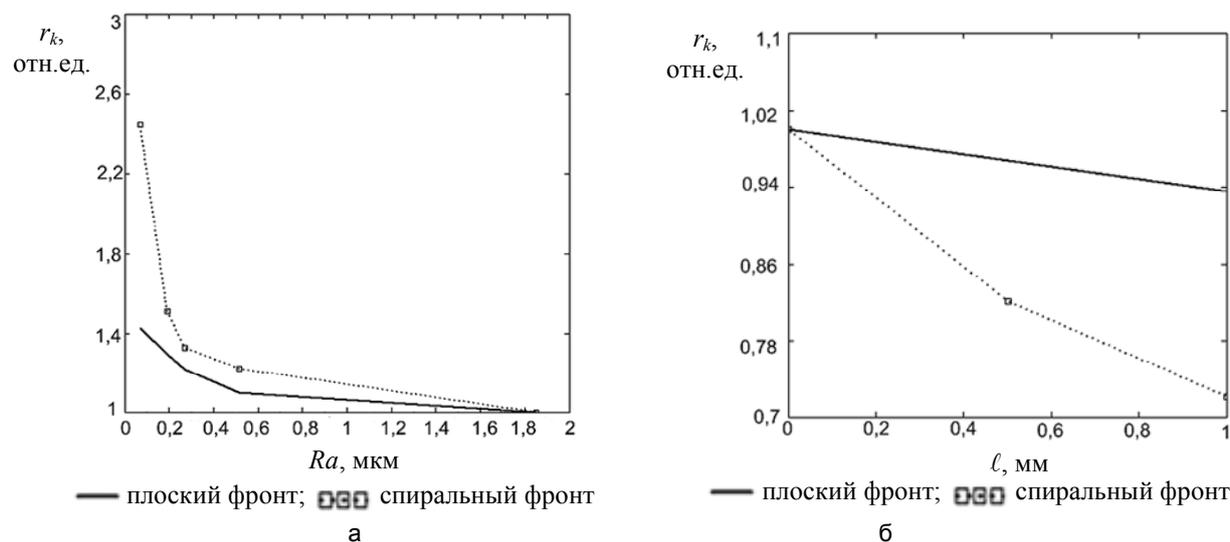


Рис. 5. График зависимости интервала корреляции спекл-картин от: параметров шероховатости Ra (а) и глубины дефекта l (б) при зондировании граней металлического параллелепипеда и кромки лопатки АД плоским и спиральным волновым фронтом излучения

Погрешности экспериментальных данных определяются нестабильностями лазерного излучения, шумами матричного фотоприемника и ошибками оцифровки сигнала и суммарно составляли не более 5%. Результаты, полученные в ходе эксперимента (рис. 5, б), подтверждают гипотезу о повышении эффективности системы дефектации кромки лопатки АД при использовании в МССОИ спирального зондирующего волнового фронта, а именно, на участках с забоинами, превышающими по глубине $l > 0,7$ мм (критическое значение), возможно возрастание чувствительности системы до 60% по отношению к системе, использующей плоский волновой фронт.

Заключение

В ходе численного моделирования и экспериментов показана возможность бесконтактного определения параметров шероховатости Ra в пределах 0,03–1,85 мкм и дефектации кромки лопатки авиационного двигателя при глубине забоины $l = 0–0,8$ мм путем обработки зарегистрированных на ПЗС-матрице спекл-картин методом корреляционного анализа.

При использовании в МССОИ спирального зондируемого волнового фронта в процессе измерения параметров шероховатости чувствительность системы повышается на 40%, а при выявлении поверхностных дефектов контролируемой детали – примерно на 60%.

Работа выполнена в рамках государственного контракта ГК 14.740.12.08.41 при поддержке Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. ГОСТ Р 53696-2009. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. – Введ. 01.01.2011. – М.: Стандартиформ. – 2010. – 7 с.
2. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Ланцов А.Д. Корреляционный метод обработки спекловой картины сигналов с одноволоконных многомодовых интерферометров с использованием приборов с зарядовой связью // Квантовая электроника. – 2006. – № 4 (36). – С. 339–342.
3. Бадалян Н.П., Кийко В.В., Кислов В.И., Козлов А.Б. Лазерная дистанционная спекл-интерферометрия. Модель формирования спекл-структуры // Квантовая электроника. – 2008. – № 5 (38). – С. 477–481.
4. Бородин А.Н., Вайчас А.А., Малов А.Н., Миронов Б.М., Неупокоева А.В., Синецын И.А., Онацкий А.Н., Сычевский А.В., Чупраков С.А. Спекл-оптические методы исследования шероховатых поверхностей и подповерхностной структуры объектов // Физика наукоемких технологий. Вып. 2. – Иркутск: ИВВАИУ, 2008. – С. 5–71.
5. Benjamin J. McMorran, Amit Agrawal, Ian M. Anderson, Andrew A. Herzing, Henri J. Lezec, Jabez J. McClelland, John Unguris. Electron vortex beams with high quanta of orbital angular // Science. – 2011. – P. 192–195.
6. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков. – М.: Физматлит, 2010. – 184 с.
7. Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Сойфер В.А. Вращение лазерных пучков, не обладающих орбитальным угловым моментом // Компьютерная оптика. – 2007. – № 31. – С. 35–38.
8. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Оптическая микроманипуляция с использованием многопорядковых ДОО // Официальные материалы научно-практической конференции «Голография в России и за рубежом. Наука и практика». – 2006. – С. 57–59.
9. Волостников В.Г., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Рахматулин М.А. Манипуляция микрообъектами с помощью пучков с ненулевым орбитальным моментом // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 7. – С. 565–566.
10. Павлов П.В., Малов А.Н., Бородин А.Н., Сычевский А.В. Применение спиральных пучков для дефектоскопии и неразрушающего контроля // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Ч. 1. – Томск: ТУСУР, 2010. – № 2 (22). – С. 70–74.

Павлов Павел Владимирович

– Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж), аспирант, pashok8208@mail.ru

Петров Николай Владимирович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, Nickolai.petrov@gmail.com

Малов Александр Николаевич

– ООО «Технологии прогресса» (г. Иркутск), доктор физ.-мат. наук, профессор, зам. директора, cohol2007@yandex.ru

УДК 53.047

СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОЙ ФОРМЫ НИКОТИНАМИДАДЕНИНДИНУКЛЕОТИДА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА И КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Е.П. Конькова

Вычислен спектр поглощения восстановленной формы никотинамидадениндинуклеотида в неэмпирическом приближении. Спектры сегментов кофермента вычислены с помощью полуэмпирического метода. Сравнение результатов, полученных в полуэмпирическом и неэмпирическом приближениях, показало, что упрощение (деление на сегменты) не вносит существенной ошибки. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало их хорошее согласие. Деление сложных органических молекул на сегменты полезно с точки зрения уменьшения времени вычисления.

Ключевые слова: аденин, никотинамид, НАДН, спектр поглощения, неэмпирические и полуэмпирические методы.

Введение

Все окислительно-восстановительные реакции в организме протекают с участием восстановленной формы никотинамидадениндинуклеотида (НАДН). Окисленная форма (НАД) поглощает излучение на длине волны 260 нм. При восстановлении до НАДН появляется дополнительный максимум поглощения

на длине волны 340 нм [1]. Концентрация кофермента является важным физиологическим показателем. Определение концентрации проводится методами флуоресцентной спектроскопии [2]. Данный кофермент при нормальных условиях представляет собой твердое, растворимое в воде вещество. Поскольку флуорофором является только восстановленная форма, возникает необходимость путем квантово-химических расчетов исследовать спектр поглощения именно восстановленной формы. Однако автору не удалось обнаружить в литературе описания модели структурной формулы НАДН. С учетом вышесказанного, целью настоящей работы являлось построение простой модели структурной формулы НАДН, чей электронный спектр удовлетворительно воспроизводит основные особенности поглощения НАДН, а именно, наличие поглощения в областях 260 и 340 нм.

Квантово-химический расчет электронных спектров поглощения модели НАДН и его субъединиц

Часто используемым в спектроскопии приемом является представление крупной молекулярной системы совокупностью структурных единиц, для каждой из которых решение электронной задачи получают стандартными методами [3]. Данный прием позволяет выделить субъединицы, в значительной степени определяющие спектральные свойства крупной молекулярной системы.

На рис. 1 представлены структурные формулы НАД, аденина и никотинамида, НАДН, субъединицы-аденина и субъединицы-никотинамида. Видно, что расчетная модель субъединицы-аденина, ответственная за поглощение НАДН в области 260 нм, совпадает со структурной формулой реального вещества аденина, а расчетная модель субъединицы-никотинамида, моделирующая поглощение НАДН в области 340 нм, отличается от структурной формулы реального вещества никотинамида. Для органических молекул, имеющих как аденин и никотинамид сопряженные двойные связи, характерно поглощение в области 260 нм. Построение расчетной модели субъединицы-никотинамида, т.е. моделирование поглощения НАДН в области 340 нм, заключалось в разрыве сопряженной углеродной связи с атомом азота N молекулы реального вещества никотинамида при одновременном насыщении свободных валентностей атомами водорода H.

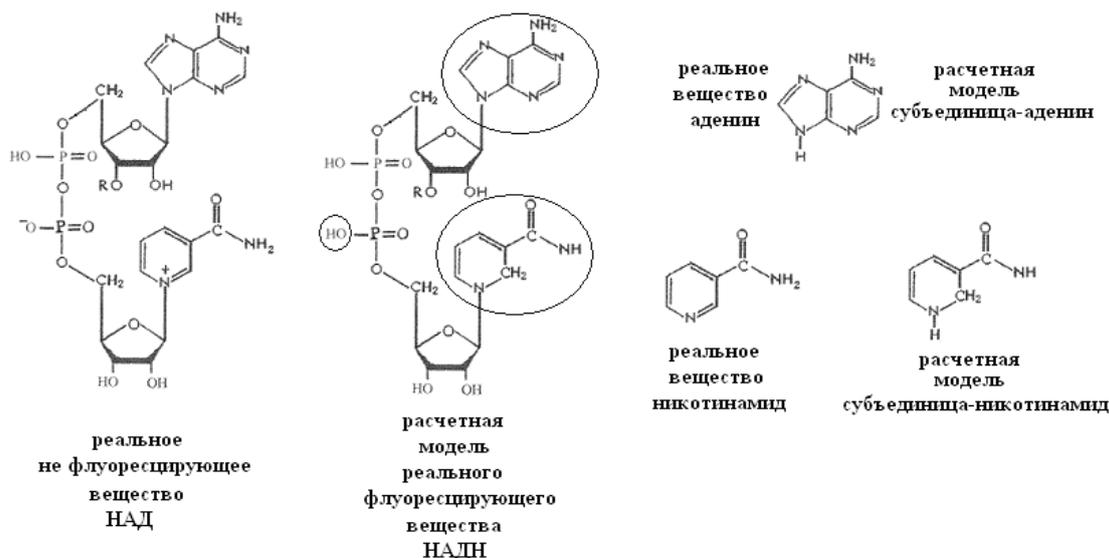


Рис. 1. Структурные формулы НАД, аденина, никотинамида, НАДН, субъединицы-аденина и субъединицы-никотинамида

В основе современной квантовой химии лежит уравнение Шредингера для стационарных состояний [4]. Его обычно решают в адиабатическом приближении, т.е. в предположении, что ядерную и электронную волновые функции можно разделить и решать уравнения для движения ядер и электронов раздельно. В этом приближении уравнение Шредингера для электронной волновой функции записывается следующим образом:

$$\hat{H}\Psi = E\Psi, \tag{1}$$

где \hat{H} – гамильтониан системы, т.е. сумма операторов кинетической и потенциальной энергии; $\Psi = \Psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – волновая функция для системы из n частиц, которая зависит от их расположения в пространстве и спинов; E – полная электронная энергия. Однако точно решить это уравнение удастся лишь в случае одноэлектронных систем. По этой причине в квантовохимических расчетах используются приближенные методы. Среди них наиболее широкое распространение получил метод Хартри–Фока, или метод самосогласованного поля. В этом методе полагается, что каждый электрон движется в поле атомных ядер, положение которых фиксировано в пространстве, и в эффективном (усредненном) поле других

электронов. Многоэлектронную волновую функцию ищут в виде антисимметризованного произведения спин-орбиталей, т.е. одноэлектронных молекулярных орбиталей (МО), умноженных на спиновые волновые функции соответствующего электрона.

В приближении Хартри–Фока уравнение Шредингера переходит в систему интегрально-дифференциальных уравнений для движения каждого отдельного электрона. МО обычно ищут в виде линейных комбинаций атомных орбиталей (ЛКАО). Таким образом, совокупность атомных орбиталей (АО) является физически наглядным базисом для построения молекулярной волновой функции. На практике обычно пользуются как полуэмпирическими, так и неэмпирическими методами. Они различаются методикой вычисления матричных элементов, описывающих взаимодействие электронов между собой и электронов и атомных ядер. В полуэмпирических методах для этой цели используются приближенные эмпирические формулы и известные из эксперимента параметры атомов. В неэмпирических методах проводится непосредственный аналитический расчет матричных элементов. Подробное описание теории МО ЛКАО можно найти, например, в [5].

Экспериментальное исследование пропускания водных растворов аденина и никотинамида

Приготовление растворов аденина и никотинамида осуществлялось путем последовательного разбавления.

Коэффициенты пропускания растворов были получены с использованием двухканального автоматизированного спектрального комплекса на базе монохроматора МДР-23 (ДАСК МДР-23). Источником излучения данного спектрального комплекса является дейтериевая лампа ДДС-30, излучающая в ультрафиолетовой области спектра 200–350 нм, а приемником – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-100) со спектральным диапазоном измерений 200–800 нм. Шаг перестройки длины волны составлял 0,1 нм, а точность перестройки – 0,05 нм.

Процедура измерения пропускания заключалась в следующем. В отсек для исследуемых образцов поочередно устанавливались кювета с дистиллированной водой и кюветы с растворами исследуемых веществ. Снималась зависимость показаний фотоприемника от длины волны. Затем на основании полученных данных рассчитывался коэффициент пропускания. Сигнал измерялся 30 раз за 1 с. Коэффициент пропускания был найден как отношение коэффициента пропускания кюветы с раствором исследуемого вещества к коэффициенту пропускания кюветы с растворителем. Перед каждым измерением проводилась калибровка прибора.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлен электронный спектр поглощения модели НАДН, рассчитанный в неэмпирическом приближении. Видно характерное для кофермента НАДН поглощение в областях 260 и 340 нм, что свидетельствует о допустимости используемой модели.

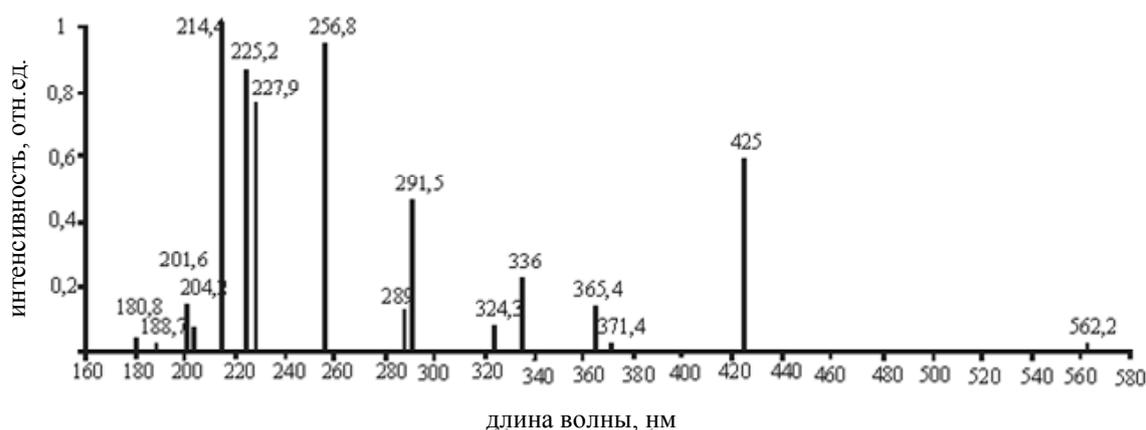


Рис. 2. Электронный спектр поглощения расчетной модели НАДН

На рис. 3, 4 представлены зависимости коэффициентов пропускания от длины волны растворов реальных веществ аденина и никотинамида и их электронные спектры поглощения, рассчитанные в полуэмпирическом приближении в вакууме. Видно, что экспериментальные и расчетные данные находятся в хорошем согласии, хотя экспериментальные данные представлены для раствора, а расчетные для изолированных молекул. Из рис. 3, 4 видно, что для реальных веществ аденина и никотинамида характерно наличие поглощения в области 260 нм и отсутствие поглощения в области 340 нм.

На рис. 5 представлены электронные спектры поглощения субъединицы-никотинамида в вакууме и в присутствии 23 молекул воды, рассчитанные в полуэмпирическом приближении. Видно, что присут-

ствует поглощение в области 340 нм и отсутствует поглощение в области 260 нм. Таким образом, появление поглощения НАДН в области 340 нм можно связать с изменениями в районе сопряженной углеродной связи с атомом азота никотинамида.

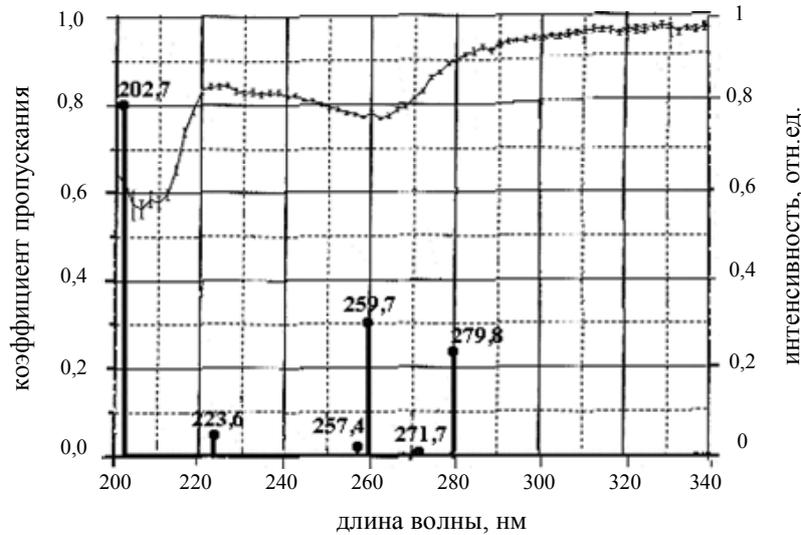


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания от длины волны раствора аденина ($4,5 \cdot 10^{-6} \%$) и электронный спектр поглощения аденина (вакуум)

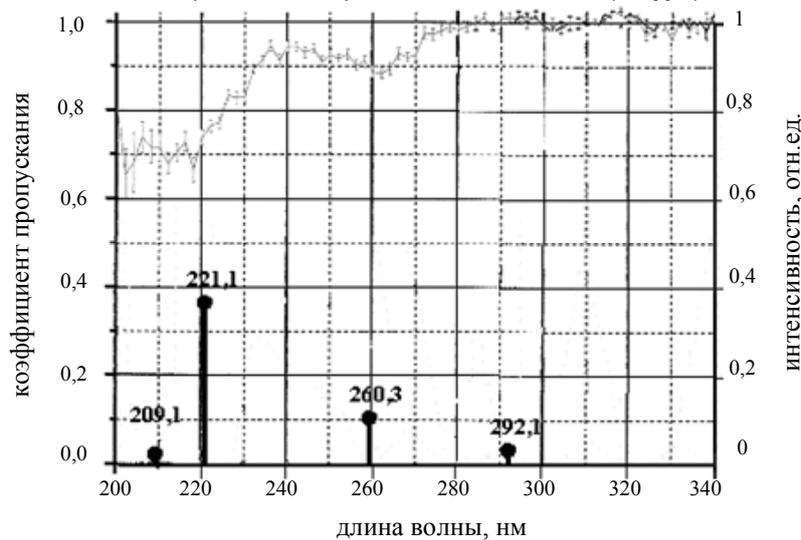


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания от длины волны раствора никотинамида (0,0003%) и электронный спектр поглощения никотинамида (вакуум)

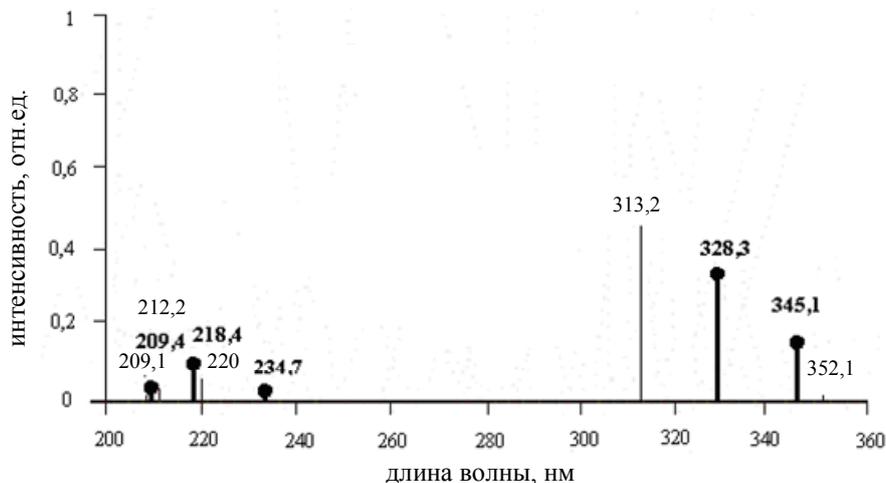


Рис. 5. Электронный спектр поглощения субъединицы-никотинамида в вакууме (тонкая линия) и в присутствии 23 молекул воды (жирная линия)

Заключение

В работе построена простая расчетная модель структурной формулы восстановленной формы никотинамидадениндинуклеотида. Показано, что электронный спектр модели удовлетворительно воспроизводит основные особенности поглощения реального вещества никотинамидадениндинуклеотида, а именно, наличие поглощения в областях 260 и 340 нм, что является прямым подтверждением допустимости предложенной модели. Кроме того, в работе выявлена связь между появлением поглощения кофермента в области 340 нм и понижением порядка углеродной связи с атомом азота никотинамида.

Литература

1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1998. – 384 с.
2. Гираев К.М., Ашурбеков Н.А., Меджидов Р.Т. Стационарная спектроскопия биотканей *in vivo*: флуоресцентные исследования некоторых патологических состояний // Оптика и спектроскопия. – 2003. – Т. 95. – № 5. – С. 874–879.
3. Никитин О.Ю., Новосадов Б.К. Теория пофрагментного расчета электронной структуры основного состояния многоатомных молекул. I. Метод промежуточного фрагмента // Журнал структурной химии. – 1995. – Т. 36. – № 3. – С. 387–394.
4. Бурштейн К.Я., Шорыгин П.П. Квантовохимические расчеты в органической химии и молекулярной спектроскопии. – М.: Наука, 1989. – 98 с.
5. Грибов Л.А., Баранов В.И., Новосадов Б.К. Методы расчета электронно-колебательных спектров многоатомных молекул. – М.: Наука, 1984. – 325 с.

Конькова Елена Петровна – Волгоградский государственный университет, ассистент, konelepet@mail.ru

УДК 681.784.88, 535.36

РАННЯЯ ДИАГНОСТИКА КАРИЕСА ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

А.А. Езерская, И.В. Романов, О.А. Смолянская, Я.В. Грачев

Исследованы угловое распределение прошедшего и отраженного терагерцового сигнала, а также терагерцовые спектры пропускания и отражения твердых тканей зуба человека (нормальных и пораженных кариесом). Выявлены характерные для кариеса терагерцовые линии поглощения, что может позволить диагностировать заболевание на ранних стадиях. Кариозное пятно увеличивает отражательную способность терагерцового сигнала, что дает уникальную возможность достаточно достоверно диагностировать кариес *in vivo* на ранних стадиях.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия, терагерцовая фотометрия, диагностика, кариес.

Введение

На сегодняшний день диагностика кариеса зубов человека представлена осмотром, методом зондирования, рентгенологическим исследованием, витальным окрашиванием, измерением биоэлектрического потенциала, электроодонтодиагностикой, трансиллюминационной диагностикой, лазерной флуориметрией. Каждый из представленных методов недостаточно точен и безопасен, особенно на ранних стадиях развития заболеваний [1–3]. Терагерцовое (ТГц) излучение, как известно, обладает высокой проникающей способностью, разрешением порядка 100 мкм, и оно безопасно для биотканей человека [4–5]. В связи с этим исследование оптических свойств твердых тканей зуба в ТГц диапазоне частот является актуальной задачей. Маловероятные трудности в ТГц диагностике могут быть связаны с содержанием некоторой доли металлов и их соединений в пломбирующих материалах. В настоящей работе сначала исследовались свойства ТГц излучения без образца – профиль ТГц излучения, длина перетяжки, диаметр пучка на полувысоте в перетяжке и угловая расходимость излучения. Затем были проведены исследования углового распределения излучения, прошедшего через образец зуба, зависимости прошедшего излучения от толщины образца, ТГц спектров пропускания и отражения нормальной и кариозной эмали зуба, а также образца дентина.

Экспериментальные установки и методики

Для экспериментального исследования углового распределения сигнала, прошедшего через образец зуба, использовался ТГц фотометр ($P_{cp} = 10 \pm 4$ мкВт; $\tau_{имп} = 3$ пс; $\nu = 0,1–1,0$ ТГц) [6]. В эксперименте были реализованы схемы исследования полного, коллимированного и диффузного пропускания твердых тканей зуба человека *in vitro*, представленные на рис. 1, а, б, в, соответственно.

Свет, попадающий на диафрагму, на первой схеме (рис. 1, а) проходил только через образец твердой ткани зуба, на второй схеме (рис. 1, б) использовалась диафрагма, которая пропускала в основном

коллимированный свет, а диффузный отражала. Таким образом, формировалась система «апертура – твердая ткань зуба – апертура». На третьей схеме (рис. 1, в) на образце помещалась круглая непрозрачная маска, которая отражала коллимированный свет. Приемник перемещался в диапазоне углов $\pm 90^\circ$ относительно нормали к поверхности образца с шагом 5° . Полученные данные нормировались на максимальное значение, в результате чего получилось угловое распределение интенсивности измеряемой величины в относительных единицах.

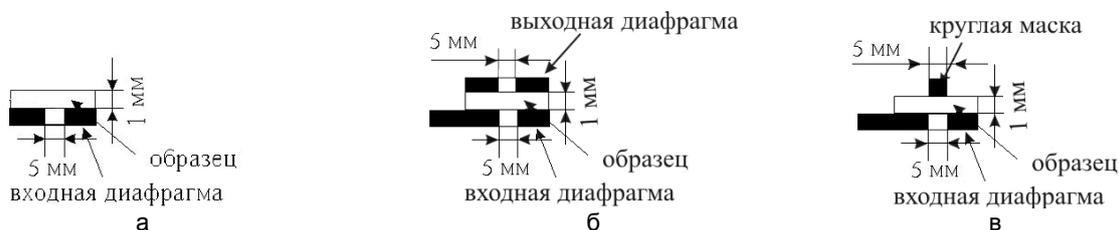


Рис. 1. Схематическое изображение крепления образца. Измерение оптического пропускания in vitro: полного (а); коллимированного (б); диффузного (в)

Для экспериментального исследования ТГц спектров пропускания и отражения образцов зуба использовался спектрофотометр ($P_{cp} = 48 \pm 4$ мкВт, $\tau_{имп} = 3$ пс, $\nu = 0,1-1,0$ ТГц) и рефлектометр ($P_{cp} = 30 \pm 3$ мкВт, $\tau_{имп} = 3$ пс, $\nu = 0,1-1,0$ ТГц) [7]. В экспериментах для каждого образца производилось по 5 измерений. Статистическая обработка результатов производилась в предположении нормальности распределения Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95. Для исследований использовались коренные зубы человека, удаленные по медицинским показаниям по стандартной методике. Основной причиной служил хронический периодонтит вследствие осложнения среднего или глубокого кариеса. Диагностика заболевания проводилась методом зондирования, электроодонтодиагностики и термодиагностики, также использовалась рентгенография. От этих зубов спиливанием получали плоскопараллельные пластины эмали и дентина толщиной 1, 2, 3, 4 и 6 мм. Образцы твердых тканей зуба человека хранились в медицинском антисептическом растворе на основе хлорамина при температуре $5-8^\circ\text{C}$ в течение пяти дней. Раствор позволял поддерживать твердые ткани зуба в состоянии, близком к естественному. Исследовались образцы клинически нормальной эмали (НЭ), нормальной дентина (НД) и кариозной эмали (КЭ).

Угловое распределение потока ТГц излучения, прошедшего через твердые ткани зуба человека

В ходе исследования был установлен профиль ТГц излучения без образца (рис. 2) и распределение его поля в пространстве (рис. 3).

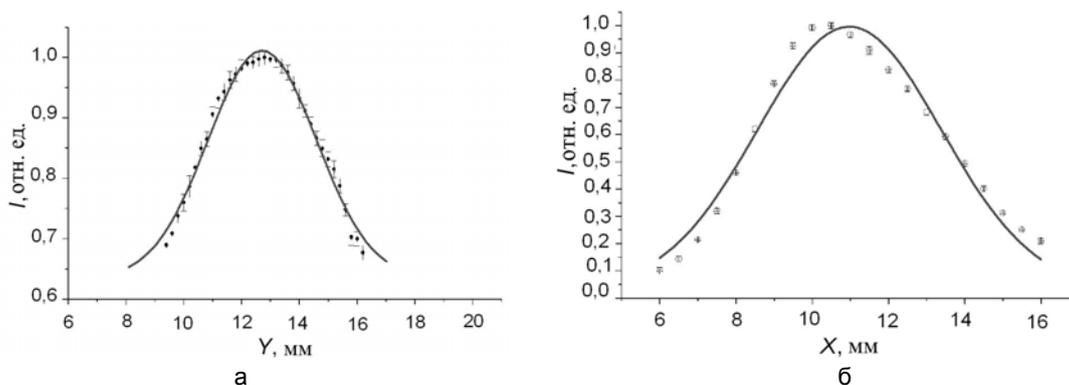


Рис. 2. Пространственное распределение интенсивности ТГц излучения по оси X (а); по оси Y (б)

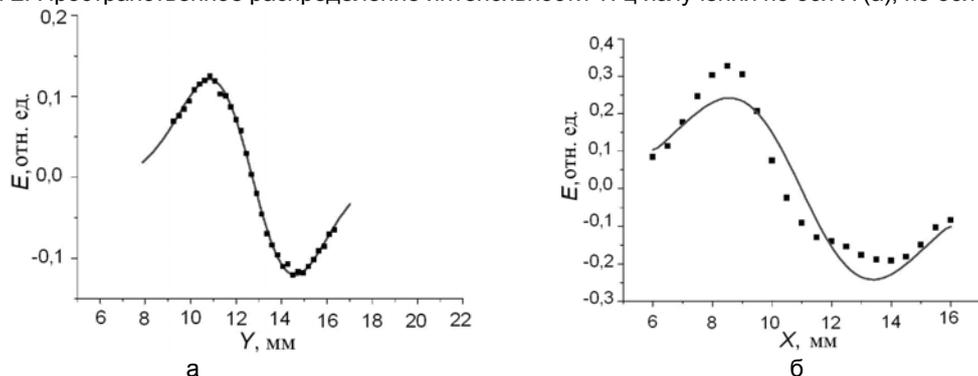


Рис. 3. Пространственное распределение поля ТГц излучения по оси X (а); по оси Y (б)

Угловая расходимость ТГц излучения составляла $14 \pm 0,35^\circ$, а исследования углового распределение потока излучения, прошедшего через твердые ткани зуба человека проводилось в области фокусировки пучка, где перетяжка на уровне 95% энергии была протяженностью 20 мм и 5 мм в диаметре.

Диффузная составляющая потока излучения, прошедшая через образец, находится на уровне шума, поэтому можно считать, что излучение рассеивается незначительно.

Рассмотрим изменение сигнала при прохождении через образцы клинически нормальных и кариозных твердых тканей зуба. Как показано на рис. 4, мощность потока излучения, проходящего через образцы клинически нормальных твердых тканей зуба человека, в 2,5–3 раза больше мощности потока излучения, проходящего через пораженные кариесом ткани.

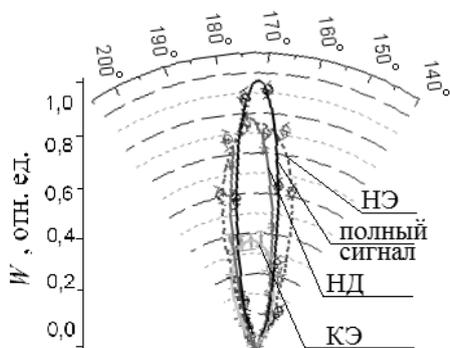


Рис. 4. Экспериментально установленное угловое распределение полного сигнала, а также сигнала, прошедшего через НД, НЭ и КЭ

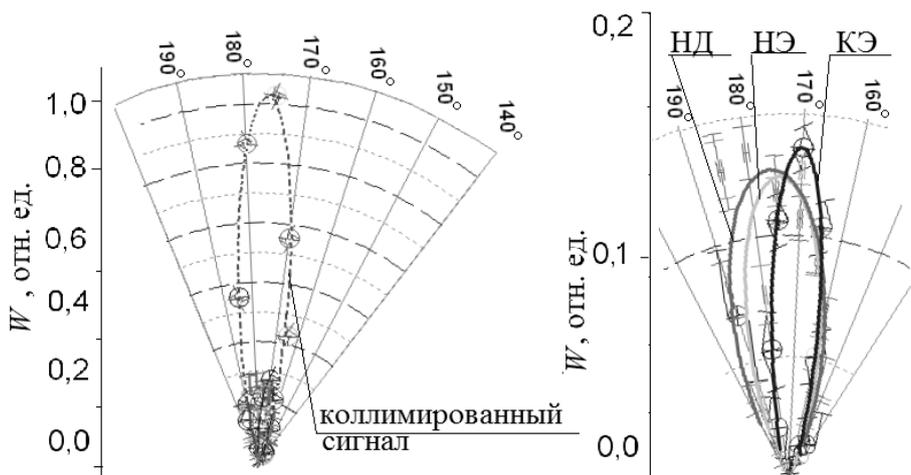


Рис. 5. Экспериментально установленное угловое распределение коллимированного сигнала, прошедшего через НД, НЭ и КЭ

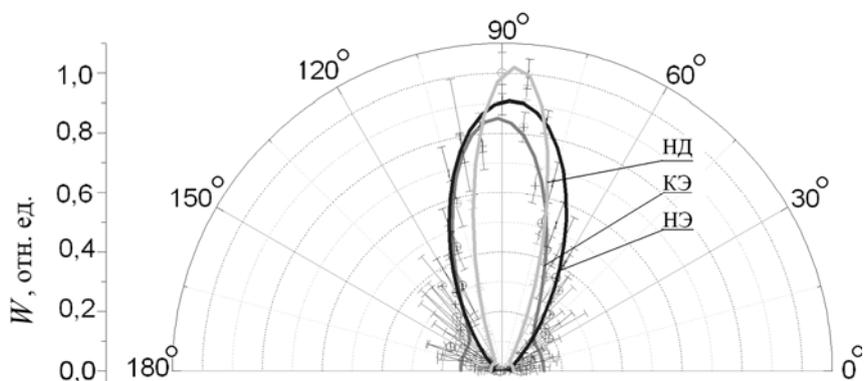


Рис. 6. Экспериментально установленное угловое распределение сигнала, отраженного от НД, НЭ и КЭ

Картина углового распределения потока отраженного излучения (рис. 6) имеет особенность – некоторый ореол вблизи образца, причем у кариозного образца ореол больше, что можно объяснить большей шероховатостью поверхности, нежели у образца нормальной твердой ткани зуба человека.

Угловое распределение потока излучения после взаимодействия с твердыми тканями зуба человека (рис. 4–6) дает не только наглядную картину, но и важные для моделирования процессов, связанных с взаимодействием ТГц излучения с биологическими объектами, параметры, такие как угол рассеяния излучения.

При исследовании зависимости пропускания твердых тканей зуба от толщины образца было экспериментально установлено, что при толщине 1 мм мощность сигнала уменьшается в 34,7 раз, при толщине образца 3 мм сигнал сопоставим с шумом, т.е. при данной толщине образец не пропускает терагерцовое излучение (рис. 7).

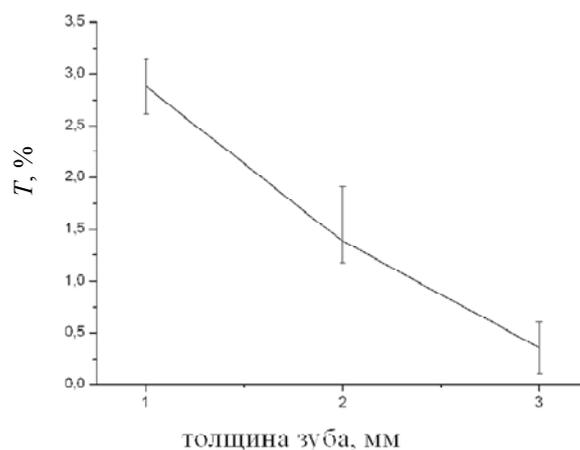


Рис. 7. Зависимость пропускания НЭ от толщины образца

Терагерцовые спектры твердых тканей зуба человека

В ходе эксперимента было установлено (рис. 8), что пропускание КЭ составляет порядка 10%, НД – в среднем порядка 30%, а НЭ – порядка 40%. Следовательно, можно говорить о том, что пропускание твердых тканей зуба человека в ТГц диапазоне электромагнитных волн имеет прямую зависимость от степени поражения кариесом. Для кариозных твердых тканей зуба были установлены характерные линии поглощения – 0,66 ТГц и 0,77 ТГц.

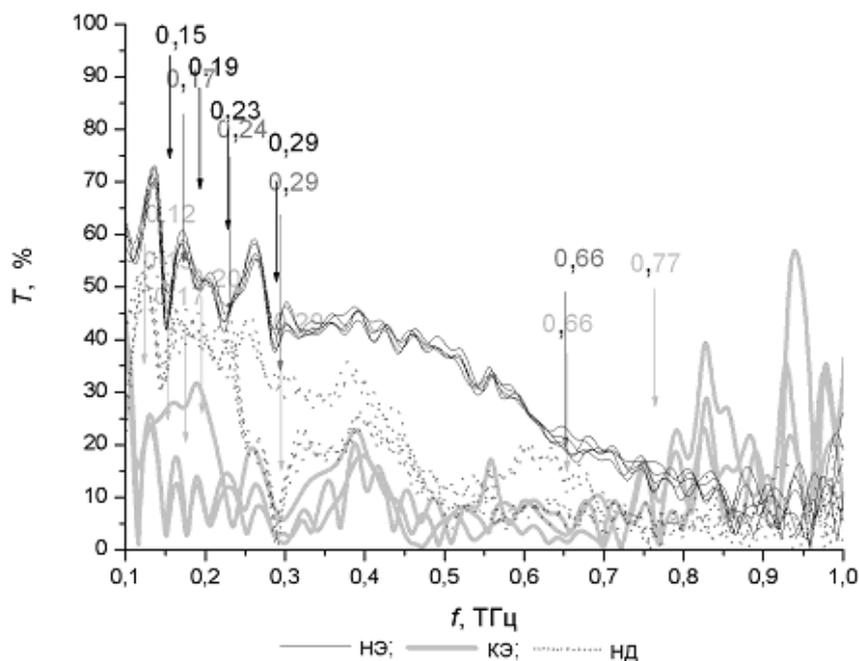


Рис. 8. Спектры пропускания КЭ, НЭ и НД

Несмотря на очевидно проявляющуюся интерференцию (резкие пики в спектральной картине), можно заключить, что отражение от НЭ в интервале 0,44–0,64 ТГц находится на уровне 20–15%, в то время как сильно пораженные кариесом образцы эмали и дентина, как и образцы с малым кариозным пятном, имеют отражение на уровне 40% (рис. 9).

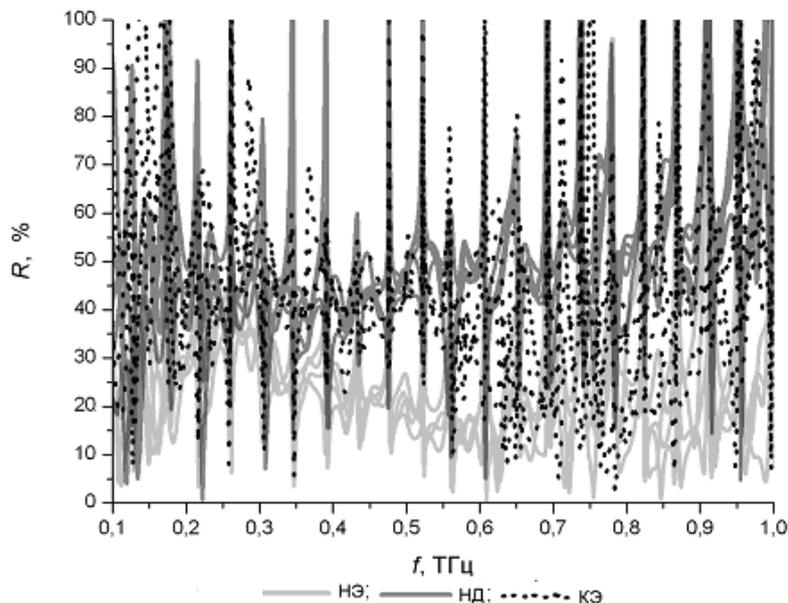


Рис. 9. Спектры отражения КЭ, НЭ и НД

Результаты численного моделирования отражения ТГц сигнала от эмали с кариесом

На рис. 10 представлены результаты вычислений методом Монте-Карло образца КЭ. Здесь для вычислений ширина ТГц пучка составляла 3 мм; $\lambda = 100$ мкм; использовалось около 29700 лучей. Оптические константы взяты из эксперимента и работы [8]. Вычисления с помощью программного пакета TracePro позволили исследовать обратное рассеяние и отражение эмали, в составе которой содержатся кариозные области сложной формы. Вычисления, проведенные на эмали с кариозными областями простой формы, не дали результатов обратного рассеяния.

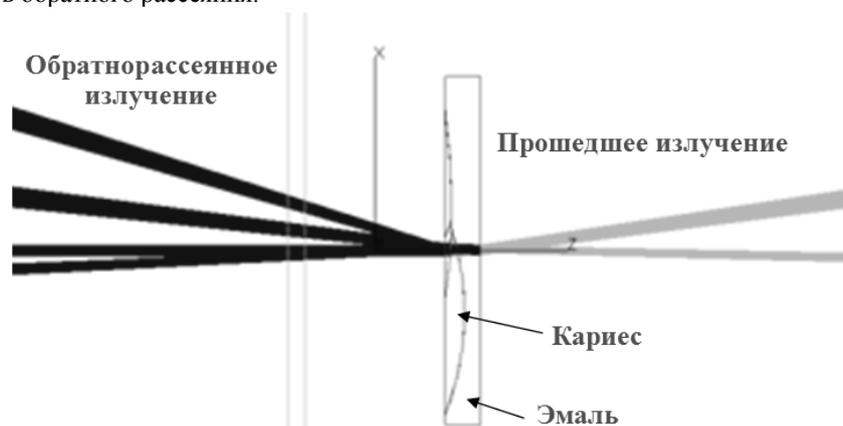


Рис. 10. ТГц отражение образца эмали зуба с кариозными областями

Заключение

Исследованы характеристики ТГц излучения диапазона 0,1–1 ТГц в области образца и приемника, получено угловое распределение прошедшего и отраженного ТГц сигнала для клинически кариозной, нормальной эмали и нормального дентина зуба человека. Эти данные позволяют проводить численное моделирование распространения ТГц излучения через твердые ткани зуба при различных конфигурациях оптической схемы.

Сохранение воды в составе вещества твердых тканей зуба человека привело к повышению уровня поглощения импульсного ТГц излучения диапазона 0,1–1 ТГц. Несмотря на это, пропускание для различной степени кариозно измененных твердых тканей зуба человека составило 20–40%, причем наименьшее пропускание наблюдалось у образцов, наиболее пораженных кариесом, а наибольшее пропускание – у кли-

нически нормальных образцов зуба, что может позволить диагностировать стадию заболевания. Выявлены характерные для кариеса линии поглощения, что позволяет диагностировать заболевание на ранних стадиях.

Кариозное изменение твердых тканей зуба человека прямо пропорционально влияет на отражательную способность зуба в ТГц диапазоне в интервале 0,44–0,64 ТГц, причем даже незначительное кариозное пятно увеличивает отражательную способность в два раза, что дает уникальную возможность достаточно достоверно диагностировать кариес *in vivo* на ранних стадиях. Исследования ТГц спектров пропускания и отражения твердых тканей зуба, здоровых и различной степени поражения кариесом, показали возможность применения такого излучения в стоматологии для диагностических целей.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (ГК №14.740.12.0841, ГК №16.513.11.3070). Также выражаем благодарность коллективу Санкт-Петербургской государственной стоматологической поликлиники № 4, особенно главному врачу А.Г. Климову, за предоставление образцов.

Литература

1. Stomatlife. Диагностика кариеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stomatlife.ru/articles/stomat/240-diagnostikakariesa>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.07.2011).
2. 03-Скорая Помощь. Кариес. Диагностика, профилактика и лечение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.03.ru/section/stomatology/article/21>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.07.2011).
3. Энциклопедия болезней. Диагностика кариеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://my-mediks.ru/content/diagnostika-kariesa>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.07.2011).
4. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. – Corvallis: Springer Science+Business Media, 2009. – 347 p.
5. Zhang X.-C., Xu J. Introduction to THz wave photonics. – N.Y.: Springer Science+Business Media, 2010. – 246 p.
6. Грачев Я.В., Куклин И.А., Герасимов И.В., Смолянская О.А., Козлов С.А., Беспалов В.Г. Исследование воздействия излучения 0,05–2 ТГц на биоткани разной толщины в медицинской диагностике // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 11. – С. 92–94.
7. Bepalov V.G., Gorodetsky A.A., Grachev Y.V., Kozlov S.A., Smolyanskaya O.A. Influence of THz broadband pulse radiation on some biotissues // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7547. – P. 754707-1.
8. Nazarov M.M., Shkurinov A.P., Kuleshov E.A., Tuchin V.V. Terahertz pulsed spectroscopy of biological tissues // Quantum Electronics. – 2008. – V. 38. – № 7. – P. 647–654.

- Езерская Анна Александровна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, a.a.ezerskaya@gmail.com
- Романов Илья Владимирович* – Томский государственный университет, аспирант, roil@elefot.tsu.ru
- Смолянская Ольга Алексеевна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, o_smolyanskaya@mail.ru
- Грачев Ярослав Владимирович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, grachev_y@mail.ru

УДК 004.89, 004.942, 338.24

**АРХИТЕКТУРА И ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЫ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТЬЮ РАЗВИТИЯ РЕГИОНА**

А.В. Маслобоев, М.Г. Шишаев

Рассматриваются задачи информационно-аналитической поддержки управления безопасностью развития социально-экономических систем регионального уровня и пути их решения на основе когнитивных информационных технологий и инструментов моделирования. Разработана концептуальная модель интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона. Предложены архитектура и технологии построения проблемно-ориентированных распределенных информационных систем поддержки управления региональной безопасностью на базе одноранговых телекоммуникационных сетей и мультиагентного подхода, обеспечивающие возможность интеграции разнородных информационных ресурсов и систем в рамках единого информационного пространства региона.

Ключевые слова: интегрированная информационная среда, когнитивный подход, информационная поддержка, управление, глобальная безопасность, региональное развитие, агентные технологии, одноранговая распределенная система.

Введение

В настоящее время особую значимость для арктических регионов РФ, превращающихся в одну из основных баз будущего развития страны, приобретают проблемы внешнего и внутреннего характера, связанные с обеспечением безопасности в различных сферах и уровнях организации социума. На современном и последующих этапах развития общественных отношений глобальная безопасность выступает важнейшим фактором устойчивого развития. Развиваемая авторами работы и их коллегами теория управления безопасностью регионального развития [1, 2], также как и концепция устойчивого развития [3], базируется на системном подходе, т.е. рассматривает объект управления (страну, регион, город, конкретную отрасль и т.п.) как систему. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность использования современных достижений в сфере компьютерных технологий и методов моделирования для исследования функционирования региональных социально-экономических систем (СЭС) с целью разработки эффективных методов и средств поддержки управления безопасностью их развития.

Настоящая работа посвящена проблемам безопасности развития арктических регионов РФ. Отдельное внимание уделяется задачам создания моделей и технологий формирования целостной информационной среды поддержки управления безопасностью регионального развития. Предлагаемые решения основаны на когнитивном подходе, который заключается в комбинировании современных научных концепций и инструментов моделирования, таких как концептуальное моделирование, системная динамика, теория мультиагентных систем, математическая теория безопасности и др.

**Современное состояние исследований в области информационных технологий поддержки
управления глобальной безопасностью**

Существенным импульсом интенсификации отечественных исследований в рассматриваемой проблемной области во многом послужила разработка «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г.», а также принятие постановления Правительства РФ «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу» (от 18.09.2008 г., Пр.1969). В данных документах декларируется, что одной из главных целей государственной политики РФ в Арктике с точки зрения обеспечения безопасности и укрепления национальных интересов является развитие сферы информационных технологий и связи. Единое информационное пространство (ЕИП), сформированное с учетом специфических особенностей Арктической зоны (АЗ), должно обеспечить системообразующую основу при подготовке, планировании и реализации мероприятий государственной политики в Арктике [4]. Для этого необходима организация и проведение отдельных комплексных исследований в сфере создания и развития когнитивных компьютерных технологий информационно-аналитической поддержки управления безопасностью развития арктических регионов. Под когнитивными технологиями, согласно [5], в данном случае понимается широкий спектр технологий рационализации и формализации интеллектуальных систем создания и функционирования знаний, экспертизы, коммуникации и принятия решения. В настоящее время когнитивные технологии широко применяются в сфере прогнозирования и стратегического планирования развития сложных динамических систем.

На сегодняшний день создано большое количество ресурсов и технологий, обеспечивающих информационно-аналитическую поддержку ряда задач в области управления глобальной и региональной безопасностью. Современные отечественные и зарубежные системы информационной поддержки управления глобальной безопасностью разрабатываются, как правило, под конкретные задачи. Большинство из них реализовано в виде узкоспециализированных диспетчерских информационных систем, информационно-прогностических систем мониторинга социально-экономического развития, информационно-аналитических систем кризисного реагирования и поддержки принятия решений, систем пространственного позиционирования, а также web-ресурсов (Интернет-порталов), предоставляющих средства информационного взаимодействия субъектов и структур безопасности и обеспечивающих доступ к информационно-справочным ресурсам и нормативным документам на основе соответствующих информационных технологий.

Несмотря на столь широкий спектр существующих решений, перечисленные типы систем являются разнородными по своей технологической платформе, функциональному назначению и компонентному составу. Большинство из них традиционно имеют централизованную архитектуру, свои специфические протоколы информационного взаимодействия и форматы хранения и представления данных, что обуславливает их слабую интегрируемость и невозможность совместного использования для комплексного решения задач управления и обеспечения экологической, экономической, социальной и техногенной безопасности развития систем регионального или федерального уровня, реализации концепции приемлемого риска и своевременного предотвращения внутренних и внешних угроз безопасности на основе согласованного взаимодействия субъектов и организационных структур безопасности независимо от их организационной и административной разнородности и территориальной распределенности. Таким образом, существующие прикладные разработки в исследуемой проблемной области, ориентированные на решение частных задач управления безопасностью развития отдельных региональных подсистем, носят бессистемный и локальный характер и не обеспечивают достижение комплексного эффекта при решении рассматриваемого класса задач. Современные тенденции исследований в области создания и развития методов и средств интеграции разнородных информационных ресурсов и систем выводят задачу управления безопасностью интегрируемых систем на принципиально новый уровень, требующий развития концепции интегрируемости и разработки специализированных решений для создания единых информационных сред поддержки проблемно-ориентированной деятельности с учетом открытости, разнородности, про-активности и распределенности, интегрируемых в рамках их компонентов.

Концептуальная модель интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью региона

Реализация проекта по созданию на территории Мурманской области специализированного Центра исследований и обеспечения безопасности в Арктике предполагает формирование ЕИП региона для повышения эффективности согласованного взаимодействия организационных структур, на которые возложены функции по обеспечению безопасности функционирования конкретных региональных подсистем и их компонентов. В работе [6] под ЕИП понимается интегрированная информационная среда, которая рассматривается как комплекс проблемно-ориентированных, взаимосвязанных и взаимодействующих информационных подсистем. В рамках проводимых исследований поэтапное формирование ЕИП региона предполагает в итоге создание открытой расширяемой многофункциональной информационно-аналитической среды (инфраструктуры), ориентированной на поддержку управления комплексной безопасностью развития региональной СЭС, наделенной потенциалом к саморазвитию и способностью адаптации к динамичному стохастическому характеру функционирования внешнего и внутреннего окружения региона. В качестве технологической платформы для практической реализации и развертывания такой инфраструктуры предлагается использовать современные технологии одноранговых распределенных информационных систем (РИС) и интеллектуальные информационные технологии, в частности, технологию мультиагентных систем [7].

Использование технологии мультиагентных систем на основе сервис-ориентированной архитектуры (SOA – service-oriented architecture) позволит создать адекватную среду информационно-аналитической поддержки управления безопасностью развития региона, учитывая распределенность, динамичность и структурную сложность образующих его подсистем. Основу сервис-ориентированного подхода составляет принцип агентной ориентации, который заключается в использовании в качестве компонентов РИС интеллектуальных агентов, автономно функционирующих и обладающих целенаправленным поведением. При таком подходе агенты реализуются в виде web-сервисов. На интеллектуальных про-активных агентов могут быть возложены функции управления отдельными аспектами безопасности регионального развития, а на основе проблемно-ориентированных коалиционных взаимодействий агентов можно будет обеспечить эффективное функционирование самоорганизующейся инфраструктуры безопасности региона и ее отдельных компонентов, а также поддержание приемлемого уровня безопасности развития на перспективу. Техноло-

гии разработки распределенных мультиагентных систем на основе SOA и преимущества использования web-сервисов для реализации агентов представлены в работе [8].

В условиях распределенности и открытости информационной среды безопасности особенную важность приобретает задача обеспечения единого структурного представления и формализации такой среды. Эту задачу позволяет решить технология концептуального моделирования [9]. Формально агентно-ориентированная модель интегрированной информационной среды поддержки управления региональной безопасностью может быть задана в виде теоретико-множественных отношений и определяет состав и взаимосвязи основных компонентов региональной инфраструктуры безопасности. Модель информационной инфраструктуры безопасности региона (ИИБР) представляется в виде композиции множеств:

$$E_{\text{ИИБР}} = \{O, S, R, SS, CS, A, Z, P, U, I, Attr\}.$$

Основными элементами, образующими ее состав, являются: O – множество объектов безопасности (люди, предприятия, региональные подсистемы и т.д.); S – множество субъектов обеспечения безопасности; R – множество информационных ресурсов; SS – множество организационных структур (территориально-распределенных групп субъектов безопасности, объединенных общей целью), ответственных за обеспечение безопасности функционирования региональных подсистем и их компонентов; CS – множество виртуальных когнитивных центров управления безопасностью функционирования конкретных региональных подсистем, объединяющих агентов с общими целями и областями интересов, ориентированных на групповое решение задач управления безопасностью; A – множество когнитивных агентов субъектов обеспечения безопасности, представляющих интересы своих хозяев в распределенной мультиагентной виртуальной среде поддержки управления безопасностью; Z – множество задач в области обеспечения определенных видов безопасности регионального развития; P – множество процессов взаимодействия субъектов обеспечения безопасности при решении различных классов задач управления региональной безопасностью; U – множество серверных и клиентских узлов системы, на которых функционируют когнитивные программные агенты; I – отношения на множествах объектов модели; $Attr$ – множество атрибутов объектов модели.

В модели явно представлены когнитивные программные агенты субъектов региональной безопасности как специальный тип объектов. Агенты обеспечивают имитацию деятельности субъектов безопасности в интегрированной информационной среде поддержки управления безопасностью, реализуют поиск потенциальных субъектов совместной деятельности и участвуют в формировании виртуальных организационных структур безопасности для решения задач управления безопасностью функционирования конкретных региональных подсистем. Отношения, представленные в модели, обеспечивают формализацию взаимосвязей и взаимодействия компонентов реальной социально-экономической среды и виртуальной среды безопасности региона.

Множество атрибутов объектов модели описывается следующим образом:

$$Attr = \langle T_A, T_R, T_O, F \rangle,$$

где T_A – множество типов агентов (web-сервисов); T_R – множество типов информационных ресурсов; T_O – множество типов (режимов) доступа к информационным ресурсам, например, on-line или off-line режимы; F – множество функций агентов.

Концептуальная модель интегрированной информационной среды поддержки управления региональной безопасностью за счет формального задания отношений на множествах объектов модели обеспечивает возможность автоматического логического вывода в процедурах формирования виртуальных организационных структур, объединяющих агентов субъектов безопасности для решения общих задач.

Архитектура и технологии формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью региона

При выборе архитектуры построения открытой расширяемой информационно-аналитической среды поддержки управления безопасностью региона принимались во внимание следующие основные факторы, определяющие специфику требований к ее функциональным возможностям и эксплуатационным характеристикам:

- территориальная распределенность и организационная разнородность субъектов безопасности;
- симметричность информационных взаимодействий субъектов безопасности;
- существование большого количества разнородных проблемно-ориентированных РИС поддержки управления различными видами безопасности регионального развития (унаследованных систем).

Территориальная распределенность субъектов безопасности естественным образом заставляет использовать при построении целостной информационной среды поддержки управления безопасностью региона распределенную архитектуру. Субъект безопасности должен иметь возможность с собственного рабочего места получать доступ ко всем (или, по крайней мере, большей части) функциям распределенной информационной среды, т.е. в информационной системе должен быть реализован распределенный

доступ к информационно-вычислительным ресурсам. Наиболее распространенной архитектурой, реализующей распределенный доступ, является архитектура с централизованным (выделенным) сервером.

«Транскорпоративный» характер современных РИС увеличивает требования к модульности построения системы и максимально возможной независимости ее компонентов. Эти требования нашли отражение в современной тенденции к использованию слабосвязанных (loosely-coupled) архитектур РИС [8]. Поскольку деятельность субъектов и организационных структур безопасности характеризуется территориальной распределенностью и организационной разнородностью субъектов, слабосвязанные, в частности, сервис-ориентированные архитектуры являются эффективным способом реализации соответствующих проблемно-ориентированных распределенных систем информационной поддержки.

Важным аспектом, который необходимо учитывать при выборе архитектуры реализации информационной среды поддержки управления безопасностью, является симметричность информационных функций и продолжительный характер информационной активности субъектов безопасности. Функции компонентов системы симметричны, если они выступают как в роли серверов, так и в роли клиентов. Подобную симметричную функциональность обеспечивают одноранговые или пиринговые (от англ. peer-to-peer, P2P) РИС. В отличие от архитектур с выделенным сервером, логика функционирования всех узлов одноранговой системы (пиров) одинакова, а информационно-вычислительные ресурсы (в том числе – системная информация), напротив, распределены. Отличительными особенностями пиринговых систем, согласно [10], являются: отсутствие централизованной координации узлов, отсутствие централизованных баз управляющей информации, доступность всех имеющихся в системе данных и служб любому узлу. Перечисленные особенности делают одноранговые системы максимально открытой, легко масштабируемой и наращиваемой архитектурой РИС. Таким образом, одноранговая архитектура обеспечивает высокие эксплуатационные показатели функционирования РИС и соответствует симметричному характеру информационного взаимодействия субъектов безопасности.

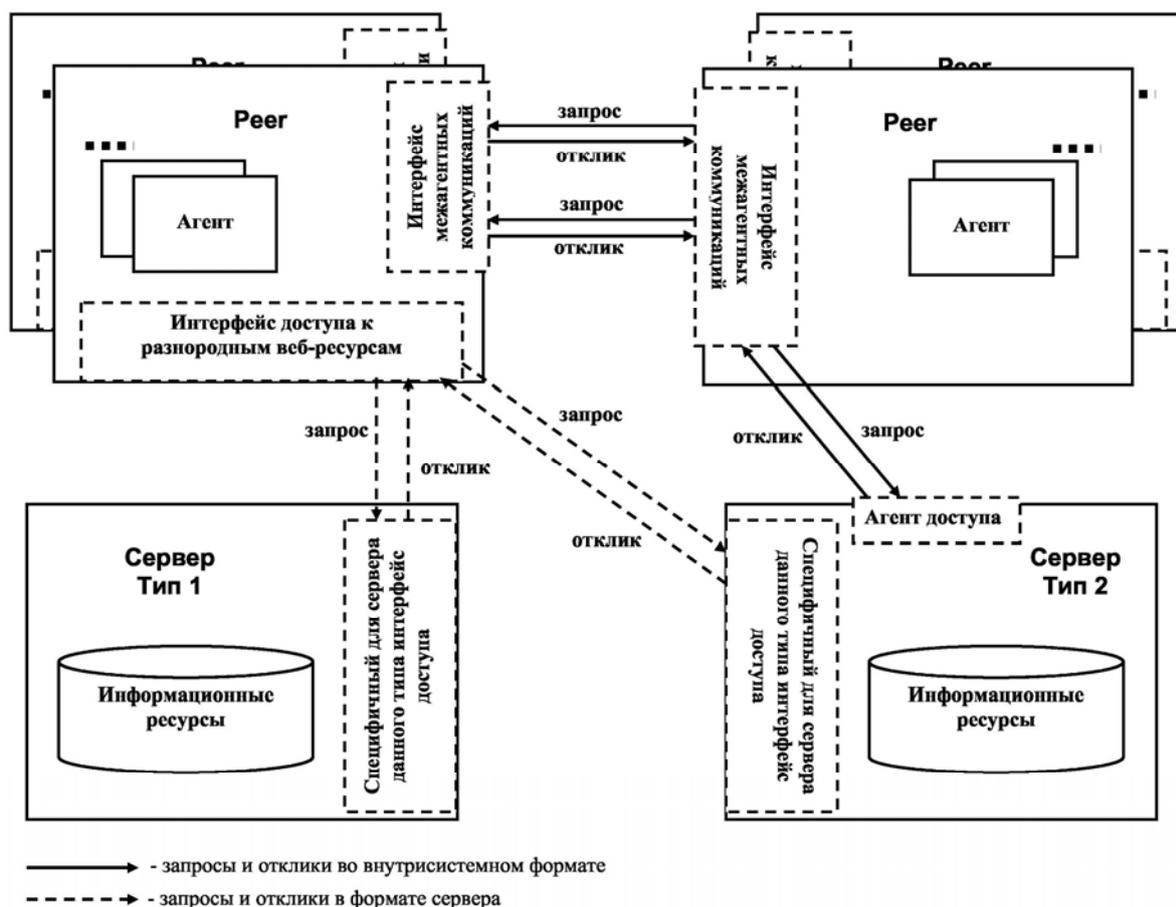


Рисунок. Обобщенная архитектура интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью региона на базе агентных и P2P-технологий

Обеспечение симметричного и продолжительного во времени информационного взаимодействия между субъектами безопасности может быть достигнуто на основе реализации агентной модели организации информационной среды [11]. Симметричная функциональность агентов создает предпосылки для более эффективного формирования возможных виртуальных организационных структур для решения

конкретных задач управления безопасностью, а их реактивность, про-активность и автономность делает распределенную среду «живой», активно функционирующей при минимальном участии пользователя. Таким образом, мультиагентный подход является адекватным средством создания открытой расширяемой саморазвивающейся информационной среды поддержки управления безопасностью.

Обобщенная архитектура интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью региона представлена на рисунке.

Основная функциональность системы реализуется узлами одноранговой сети (на рисунке – Peer), выполняющими также роль агентной платформы. Взаимодействие между агентами, дислоцирующимися на пирах, симметрично: каждый из них может как быть источником информационного запроса, так и играть роль сервера, обслуживающего запрос со стороны другого агента.

Серверы 1-го и 2-го типов представляют в составе единой информационной среды существующие системы информационной поддержки управления безопасностью. К первому типу относятся системы, не допускающие инсталляции на стороне сервера дополнительных программных модулей, реализующих агентов доступа к серверным данным. Для работы с серверами такого типа используются обычные механизмы и протоколы передачи запросов и получения результатов их обработки, например, протокол HTTP. Согласование общесистемных форматов запросов и откликов, а также используемых схем данных осуществляется на стороне пира в рамках интерфейса доступа к разнородным веб-ресурсам. Такой подход к интеграции унаследованных систем, очевидно, наиболее гибок, однако сопряжен с потенциально большей нагрузкой на коммуникационную сеть, так как исключает возможность предварительной обработки извлеченных данных на стороне сервера и отправки в рамках отклика более компактного результата. Второй тип сервера, напротив, допускает инсталляцию программного обеспечения агента доступа, осуществляющего все необходимые преобразования форматов данных и используемых схем локально, на стороне сервера, и взаимодействующего с другими агентами с использованием общесистемных коммуникационных протоколов и форматов данных. Для согласования разных технологий хранения и представления данных на стороне информационных серверов предлагается использовать программные адаптеры ресурсов, реализующие специфичные для каждого конкретного ресурса механизмы доступа и извлечения данных.

Заключение

В ходе проведенных исследований были получены следующие основные результаты.

1. Обоснована необходимость адаптации и развития существующих, а также создания новых научно-методических разработок для решения задач в области информационно-аналитической поддержки управления безопасностью развития арктических регионов с учетом специфических особенностей АЗ РФ.
2. Разработана агентно-ориентированная модель интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона, обеспечивающая технологическую основу для решения задач информационной поддержки согласованной деятельности организационных структур в области обеспечения безопасности функционирования региональных подсистем.
3. Предложены архитектура и технологии формирования целостной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона на базе одноранговых телекоммуникационных систем и мультиагентного подхода.

Литература

1. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Обеспечение глобальной безопасности регионального развития: постановка задачи // Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макросистемами. – 2010. – Т. 59. – С. 29–44.
2. Смирнов А.И., Агеев А.И., Кретов В.С., Котов Н.М., Котов М.Н., Кохтюлина И.Н., Куроедов Б.В., Сандаров О.В. Глобальная безопасность: инновационные методы анализа конфликтов. – М.: Общество «Знание» России, 2011. – 272 с.
3. Путилов В.А., Горохов А.В. Системная динамика регионального развития. – Мурманск: НИЦ «Пазори», 2002. – 306 с.
4. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Информационно-аналитическая поддержка управления безопасностью развития Арктических регионов России: задачи, методы, технологии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3 (73). – С. 143–145.
5. Десятков И.В., Малинецкий Г.Г., Маненков С.К., Митин Н.А., Отоцкий П.Л., Ткачев В.Н., Шишов В.В. Когнитивные центры как информационные системы для стратегического прогнозирования // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2011. – № 1. – С. 65–81.
6. Юсупов Р.М., Заболотский В.П. Концептуальные и научно-методологические основы информатизации. – СПб: Наука, 2009. – 542 с.

7. Маслобоев А.В., Шишаев М.Г. Одноранговая распределенная мультиагентная система информационно-аналитической поддержки инновационной деятельности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 4 (62). – С. 108–114.
8. Путилов В.А., Шишаев М.Г., Олейник А.Г. Технологии распределенных систем информационной поддержки инновационного развития региона // Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макросистемами. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. – Т. 39. – С. 40–63.
9. Емельянов С.В., Попков Ю.С., Олейник А.Г., Путилов В.А. Информационные технологии регионального управления. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 400 с.
10. Сухорослов О.В. Принципы самоорганизации в пиринговых системах // Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макросистемами. – 2004. – Т. 8. – С. 141–174.
11. Швецов А.Н., Яковлев С.А. Распределенные интеллектуальные информационные системы. – СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. – 318 с.

Маслобоев Андрей Владимирович – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, кандидат технических наук, доцент, докторант, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

Шишаев Максим Геннадьевич – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией, shishaev@iimm.kolasc.net.ru

УДК 004.942:001.57

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КИНЕМАТИЧЕСКОГО, ДИНАМИЧЕСКОГО
И ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАШИНОСТРОЕНИЯ****А.М. Терлецкая, Н.Р. Райц, И.Г. Лимарева, Е.К. Фомичева, Е.Л. Мурых**

Рассмотрена возможность применения современных CAE-систем (ADAMS, ANSYS) для проведения кинематического, динамического и прочностного анализа. Разработана и представлена методика комплексного автоматизированного анализа, позволяющая провести исследование сложных механизмов с большой точностью и в короткие сроки. На основе разработанной методики проведены исследования пространственных механизмов: возникновение контактных напряжений, механика разрушения сварных конструкций.

Ключевые слова: автоматизированный анализ, моделирование, механические системы, контактные напряжения.

Введение

Для получения надежных и экономичных несущих конструкций машин и механизмов необходима разработка прогрессивных методов расчета с учетом использования новейших вычислительных и программных средств.

Наличие на сегодняшний день на рынке программных продуктов коммерческих версий систем автоматизированного проектирования (AutoCAD, CATIA, PRO/ENGINEER и др.) и анализа (ADAMS, Cosmos/M, ANSYS, NASTRAN и др.) требует их обоснованного выбора для решения конкретной проблемы, а также создания гибкого интерфейса между двумя указанными классами программного обеспечения.

Предлагается новый системный подход на основе поэтапного использования CAD/CAE/CAM-систем, в рамках которого предложены процедуры проектирования с использованием геометрического моделирования, прочностного анализа на основе концепции «соответствие назначению», эскизного проектирования и выработки рекомендаций для построения технологических процессов.

Развитие средств вычислительной техники стимулировало распространение инженерного анализа практически на все этапы проектирования машиностроительных технологий и изделий. Многообразие физических процессов в наукоемких изделиях, субъективность в постановке задач анализа, выбор методов решения и многие другие причины привели к огромному числу методик, алгоритмов и программ, предназначенных для решения задач анализа изделий машиностроения.

К первой группе программ – программным средствам проектирования, органично объединяющим процессы конструирования и анализа в едином комплексе, – относятся системы CATIA5 (DS, Франция), UNIGRAPHICS (US, США), PRO/ENGINEER (PTC, США), EUCLID3 (EADS MD, Франция). Во вторую группу программ входят универсальные программы анализа изделий машиностроения ANSYS (США), SAMTECH (Бельгия), MSC.VISUAL NASTRAN ENTERPRISE (США), MSC.ADAMS и др.

Этапы комплексной методики решения кинематических, динамических и прочностных задач

Новый системный подход можно определить как интегрированную технологию проектирования, так как процесс совершенствования проектного решения связан с анализом и оптимизацией модели изделия. В рамках данного подхода была рассмотрена возможность применения системы ADAMS для проведения кинематического, динамического анализов и прочностного анализа с использованием системы ANSYS. В программном комплексе ADAMS динамический анализ моделей механизмов представлен большим набором средств и способов. ADAMS предоставляет возможность быстрой и удобной расстановки различных сил, крутящих моментов, моментов инерции тел и их масс. ANSYS представляет собой программу, основанную на методе конечных элементов, с помощью которой создается компьютерная модель или обрабатывается CAD-модель конструкции, изделия или его составной части; моделируются действующие усилия или другие проектные воздействия; исследуются отклики системы различной физической природы в виде распределений напряжений и температур, электромагнитных полей.

При проведении динамического анализа в системе ADAMS узловые соединения (шарниры) устанавливаются лишь схематично, не имеют массы и, вследствие этого, не экспортируются в конечно-элементные системы для проведения дальнейшего анализа. Шарнирные соединения следует проектировать самостоятельно уже непосредственно в конечно-элементной системе.

Для изучения взаимодействия систем макроанализа ADAMS и микроанализа ANSYS рассматривались отдельные элементы конструкции.

Разработанная методика позволяет провести комплексный анализ сложных механизмов с большей точностью и в более короткие сроки по сравнению с аналитическим решением.

Ниже приведены этапы комплексной методики решения кинематических, динамических и прочностных задач механизмов на примере пространственных манипуляторов с использованием CAE-систем.

1. Формируется расчетная схема. Необходимые данные: кинематическая схема объекта, геометрия (межосевые расстояния или расстояния между центрами шарниров), предварительные весовые характеристики элементов, краевые (начальные и граничные) условия, силовые условия (нагрузки).
2. Кинематический и динамический анализы объекта в системе ADAMS. Определение наиболее опасного расчетного случая, т.е. положения объекта с максимальными динамическими и статическими усилиями.
3. Трансляция модели в систему ANSYS. Минимальный набор информации, передаваемый в ANSYS, включает межосевые расстояния для элементов и нагрузки для расчетного случая.
4. Прорисовка геометрии на основе конструирования формы элементов объекта, выбор материалов для элементов, геометрии шарниров. Создание конечно-элементной модели для отдельных элементов.
5. Решение прочностной задачи для каждого элемента объекта с оптимизацией его геометрии в ANSYS. Уточнение геометрии и веса каждого элемента объекта.
6. Трансляция моделей в систему ADAMS. Минимальный набор информации включает межосевые расстояния, положение центров тяжести и весовые данные элементов объекта.
7. Повторный кинематический и динамический анализы объекта. Уточнение расчетного случая и усилий.

Применение комплексной методики для решения прикладных задач

На основе предлагаемого подхода были проведены исследования, содержание и основные результаты которых представлены ниже.

Рассмотрено состояние проблемы, тенденции развития и применения манипуляционных систем. Разработка методов структурно-кинематического анализа и синтеза, кинетостатического и прочностного расчета параллельных манипуляторов с замкнутыми цепями (ПМ с ЗЦ) повлечет за собой создание качественно новых технологических машин. Проектирование машин подобного класса, ввиду их высокой сложности, требует применения совершенных и точных методов анализа и расчета [1, 2]. Однако вследствие того, что разработка машин на основе ПМ с ЗЦ ведется сравнительно недавно, для них не существует систем автоматизированного анализа, ориентированных на их проектирование.

Как правило, автоматизация проектирования технологических машин, мобильных роботов и манипуляторов обычно ограничивается только подготовкой чертежей с использованием CAD-систем обычного назначения (например, AutoCAD [3, 4]), а все работы по предварительному проектированию ведутся практически вручную. Эффективность такого подхода является очень низкой. В связи с этим проблема разработки алгоритмов и методов автоматизированного анализа параметров прочности несущих конструкций машин и манипуляторов, в том числе ПМ с ЗЦ, для проектирования технологических машин является чрезвычайно актуальной [5, 6].

Выполнен обзор систем автоматизированного анализа и рассмотрена возможность применения CAE-систем для моделирования и анализа механизмов. Для оценки прочности и долговечности элементов параллельного манипулятора необходимо рассмотреть следующие задачи моделирования:

- расчет динамических и силовых характеристик ПМ с ЗЦ. Эта задача относится к задачам макроуровня;
- расчет на прочность элементов шарнирных соединений, сварных соединений ПМ с ЗЦ. Решение данной задачи относится к микроуровню.

Комплексный метод расчета и проектирования элементов манипуляторов должен базироваться на решении вышеуказанных взаимосвязанных задач и будет реализовываться на базе пакетов MSC.ADAMS и ANSYS [7].

Приведены методы динамического анализа механических систем, лежащие в основе системы ADAMS, теория метода конечных элементов, лежащего в основе системы ANSYS. Основой ADAMS являются системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику исследуемого объекта. Применение устойчивых методов «жестких» систем дифференциальных уравнений обеспечивает получение необходимых результатов с минимальными затратами времени, компьютерных ресурсов и с большой надежностью.

Разработана приближенная расчетная схема манипулятора в системе ADAMS (рис. 1). Произведен кинематический и динамический анализ манипулятора при произвольных краевых и силовых условиях. Полученные значения сил в шарнире соответствуют предполагаемым, исходя из значения масс элементов и прикладываемых внешних усилий.

Несмотря на множество достоинств, ADAMS имеет недостаток: все элементы анализируемых моделей являются жесткими. Для решения этой проблемы система предоставляет возможность обмени-

ваться данными с конечно-элементными системами. В частности, система ANSYS позволяет создавать файл *.mnf (modal neutral file), который в дальнейшем импортируется в ADAMS.



Рис. 1. Модель манипулятора, разработанная в системе ADAMS

Изучен и использован интерфейс взаимодействия систем макро- и микро моделирования ADAMS –ANSYS. Предложены рекомендации по его применению. Был произведен экспорт элементов модели манипулятора в формат Parasolid для передачи в систему ANSYS [5]. После импорта твердотельного элемента в конечно-элементную систему была создана деформируемая модель элемента конструкции (элемент разбит на конечные элементы Solid45, Beam4) (рис. 2).

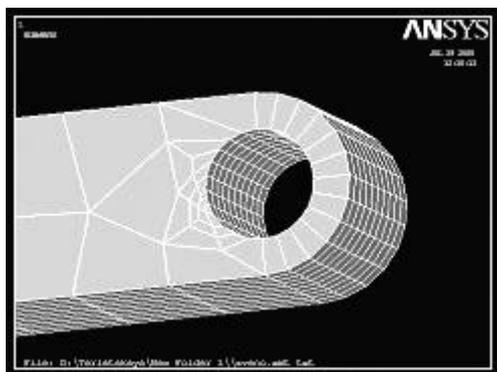


Рис. 2. Деформируемый элемент конструкции в системе ANSYS

Используя средства передачи данных обратно в систему ADAMS, была подготовлена модель (рис. 3) и создан соответствующий файл *.mnf. С помощью встроенных средств деформируемые элементы были вновь импортированы в ADAMS для повторного проведения динамического, кинематического анализов и уточнения расчетного случая и усилий.

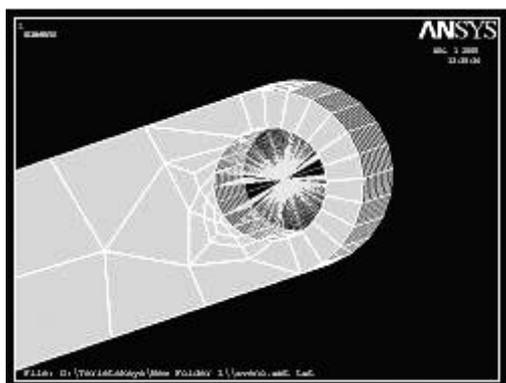


Рис. 3. Модель, подготовленная для экспорта

Рассмотрена задача возникновения контактных напряжений в элементах пространственных шарнирных узлов ПМ с ЗЦ (рис. 4). Шарнирные узлы, как правило, являются наиболее ответственными и наименее долговечными элементами конструкции. Основным критическим элементом шарнирного узла является проушина, имеющая очень низкий предел выносливости по сравнению с пределом вынос-

ливости самого материала. Природа этого явления заключается в высоком уровне концентрации напряжений около нагруженного отверстия, где в зоне максимальных окружных напряжений имеет место коррозия трения (фреттинг-коррозия), связанная с механическим истиранием поверхностей [4, 6].

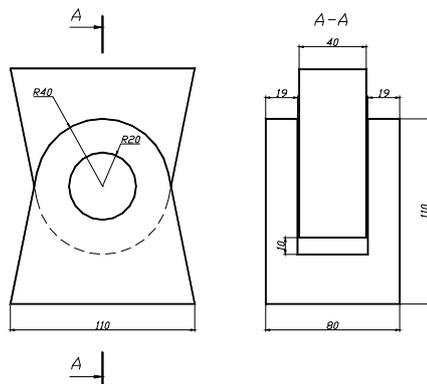


Рис. 4. Геометрическая модель проушины

Решение задачи проводилось в уточненной нелинейной постановке с учетом упругопластического деформирования материала и контактного взаимодействия поверхностей деталей. Решение нелинейных задач осуществляется шагово-итерационным методом последовательных нагружений. Для описания пластического поведения использовалась билинейная модель с кинематическим упрочнением, которая справедлива для большинства металлов в случае небольших пластических деформаций.

На рис. 5, 6 можно наблюдать изгиб оси, который влечет за собой сложную деформацию вильчатой проушины и контактную деформацию смятия центральной проушины. Максимальные напряжения растяжения, равные 429 МПа, наблюдаются в нижней части оси и вызваны изгибающим моментом.

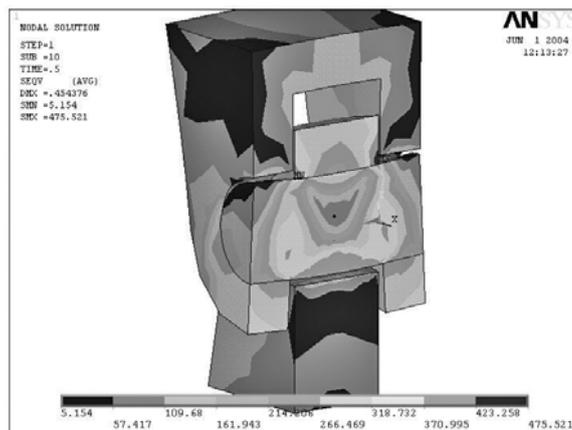


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние модели в системе ANSYS

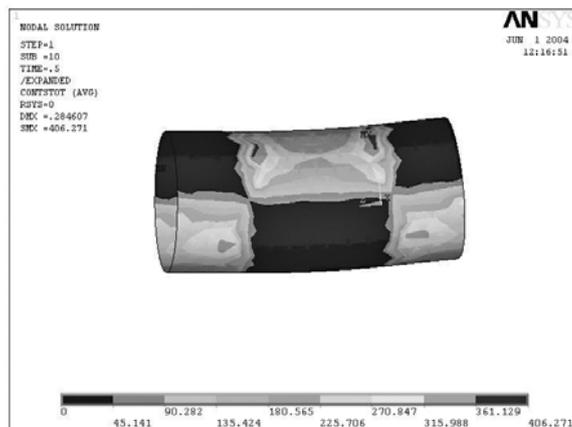


Рис. 6. Контактные напряжения, рассчитанные в системе ANSYS

Результаты проведенных исследований показали, что даже при приложении небольшой нагрузки в зоне отверстий проушин возникают значительные напряжения, превышающие допустимый предел. Так-

же были рассмотрены способы уменьшения величины контактных напряжений с использованием технологических факторов (посадка оси с натягом, установка вильчатой проушины под углом к центральной проушине).

Исследованы проблемы механики разрушения сварных конструкций. Рассмотрены образцы, моделирующие поведение основных типов сварных соединений. Используя программу ANSYS, получены значения коэффициента интенсивности напряжений. С помощью программного пакета нетрадиционного математического моделирования многомерных зависимостей ANETR определены регрессионные зависимости и статистические характеристики.

Заключение

Разработана и представлена методика комплексного автоматизированного анализа, позволяющая провести исследование сложных механизмов, основанная на применении системы ADAMS для кинематического, динамического анализов и системы ANSYS для прочностного анализа. С применением данной методики проведен анализ модели пространственного манипулятора. В системе ADAMS получены результаты в виде графиков и числовых значений перемещений, скоростей, ускорений в различных узловых соединениях механизма, рассчитаны реакции системы в виде усилий и моментов. Отдельные элементы механизма (шарнирные соединения) рассмотрены в системе ANSYS, с помощью которой построена конечно-элементная модель проушины и проведен прочностной анализ. Выполнен повторный кинематический и динамический анализ объекта. Уточнены расчетные случаи и усилия.

Внедрение технологии автоматизированного динамического и прочностного анализов позволит значительно сократить сроки, обеспечить необходимую точность, уменьшить стоимость решения за счет отсутствия необходимости создания натурального образца и проведения дополнительных экспериментов, позволит для конкретного продукта сделать свой вклад в создание системы CALS-технологии [8] проектируемой системы в целом.

Литература

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
2. Норенков И.П., Нургужин М.Р. Информационная поддержка машиностроительных изделий // Сборник трудов Международного симпозиума информационные и системные технологии в индустрии, образовании и науке, посвященный 50-летию КарГТУ. (Караганда, 24–25 сентября 2003 г.). – Караганда: КарГТУ, 2003. – С. 16–18.
3. Левковец Л.Б., Тарасенков П.В., Сокуренок Ю.А. Autodesk Inventor. Базовый курс на примерах. – СПб: БХВ Петербург, 2008. – 400 с.
4. Левковец Л.Б. Самоучитель AutoCAD 2010. – СПб: БХВ Петербург, 2009. – 400 с.
5. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. – 4-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 639 с.
6. Степанов П.Б., Нургужин М.Р., Альтер И.М. Основы автоматизированного расчета деталей методом конечных элементов. – Караганда: КарПТИ, 1988. – 93 с.
7. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
8. Погорелов В.И. Система и ее жизненный цикл: введение в CALS-технологии: Учебное пособие. – СПб: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2010. – 182 с.

| | |
|---------------------------------------|---|
| <i>Терлецкая Анастасия Михайловна</i> | – Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, ternast@mail.ru |
| <i>Райц Надежда Робертовна</i> | – Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, nadyareiz@mail.ru |
| <i>Лимарева Инна Григорьевна</i> | – Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, innalim21@mail.ru |
| <i>Фомичева Елена Константиновна</i> | – Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, fomicheva_lena@mail.ru |
| <i>Мурых Елена Львовна</i> | – Карагандинский государственный технический университет, ст. преподаватель, Murykh@mail.ru |

УДК 658.512.4:658.012.011.56.012.3

**ПРИМЕНЕНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ МЕТРИК ДЛЯ АНАЛИЗА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

Д.Д. Куликов, Е.И. Яблочников

Предлагается методика оценки уровня автоматизации технологической подготовки производства с использованием «пространства автоматизации». Предложен комплекс метрик, включающий объемный коэффициент автоматизации, полный коэффициент автоматизации и коэффициент готовности. Приведены типы проектов и их оценка с помощью предложенных метрик.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, уровень автоматизации, метрики для оценки уровня автоматизации.

Введение

Развитие информационных и производственных технологий требует постоянного совершенствования системы технологической подготовки производства (ТПП), что должно осуществляться одновременно с выполнением целевых функций ТПП. Таким образом, разработка стратегии развития ТПП является важнейшей задачей руководства промышленного предприятия. Совершенствование ТПП обычно осуществляется на основе методологии реинжиниринга [1]. Начальный этап реинжиниринга – это моделирование и создание функциональной, информационной и организационной моделей. На основе моделей оценивается существующий уровень автоматизации, определяются объекты автоматизации и перспективы совершенствования ТПП. Однако отсутствие интегральных критериев, определяющих уровень автоматизации, препятствует объективной оценке состояния дел и перспектив развития, что может привести к недопустимо большим затратам на автоматизацию ТПП и увеличению стоимости выпускаемых изделий.

Определение планов развития ТПП осложнено большим разнообразием структурных вариантов, которые можно реализовать при построении системы автоматизированной технологической подготовки производства (АСТПП). В связи с этим необходимо определить критерии (метрики), на основе которых целесообразно выполнять хотя бы приближенную оценку возможных вариантов автоматизации ТПП, выделять опасные риски и в процессе итераций последовательно их пересматривать и минимизировать в соответствии с идеологией разработки программной системы на основе унифицированного процесса [2].

Оценочные метрики для анализа ТПП

В настоящее время существует достаточно много метрик, оценивающих программные продукты с различных точек зрения. Однако все они являются узкоспециализированными и не могут быть использованы для указанных выше целей. Наиболее общими являются метрики Лоренца–Кидда. Например, метрика NSUB (Number of SUBsystem) – количество подсистем, метрика NKC (Number of Key Classes) – количество ключевых классов, метрика NSS (Number of Scenario Scripts) – количество описаний сценариев. Эти метрики малопригодны для оценки проектов создания автоматизированных подсистем ТПП. На взгляд авторов, необходимо иметь метрики, позволяющие всесторонне оценивать проект какой либо системы, например, количество автоматизируемых задач, объемы видов обеспечения, сложность разработки этапов проекта и т.д.

На основе проведенных исследований в работе предлагается методика, которая может быть использована для такой оценки проектов. В основу этой методики положено понятие «пространство автоматизации», которое образовано путем рассмотрения ТПП в трех направлениях:

1. этапы разработки проекта;
2. виды обеспечения этапов разработки;
3. подсистемы и задачи ТПП.

Если каждое направление представить в виде ортогональной оси в трехмерной системе координат, то получим пространство автоматизации (ПА), охватывающее все элементы автоматизации (рис. 1).

Обозначим оси ПА.

Ось D – этапы проектирования (**D**esign stages): d_1 – предпроектный анализ; d_2 – разработка ТЗ; d_3 – разработка технического проекта; d_4 – разработка рабочего проекта; d_5 – опытно-промышленное внедрение; d_6 – эксплуатация подсистемы ТПП.

Ось K – виды обеспечения (**K**inds of maintenance): k_1 – методическое; k_2 – информационное; k_3 – лингвистическое; k_4 – программное; k_5 – техническое; k_6 – организационное; k_7 – правовое.

Ось S – подсистемы (задачи) подготовки производства (Subsystems of preparation of manufacture). Если при обозначении оси S необходимо отличать подсистемы от задач, то будем считать, что S^s – обозначение оси для подсистем, а S^t – для задач.

Каждый элемент ПА имеет 3 координаты, и, следовательно, можно его обозначить следующим образом: $E(d_i, s_j, k_z)$ или $E_{i,j,z}$. Например, $E(d_1, s_1, k_1)$ или $E_{1,1,1}$ означает методическое обеспечение предпроектного анализа ТПП для задачи обеспечения технологичности конструкции изделия. Элемент $E(d_i, s_j, k_z)$ считается пустым, если отсутствует вид обеспечения, который должен быть закреплен за этим элементом.

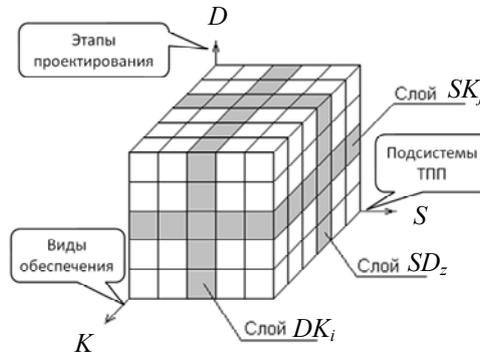


Рис. 1. Пространство автоматизации ТПП

ПА будем рассматривать как множество ПА его элементов мощностью $n = |\text{ПА}|$, которое характеризует объем пространства автоматизации.

В ПА целесообразно рассматривать лишь вектора, направленные вдоль осей координат. Каждый вектор может быть обозначен следующим образом: $\mathbf{V}(E_n, E_k)$, где E_n – начальная координата, а E_k – конечная координата вектора.

Аналогичным образом можно выделить для рассмотрения отдельные слои куба. Слои всегда считаются параллельными одной из координатных плоскостей, поэтому для их обозначения можно использовать лишь одну координату, показывающую, насколько отстоит слой от соответствующей координатной плоскости. Общее обозначение слоя – $S(x)$, где x – координата слоя. Для типовых слоев примем следующие обозначения:

- $SK(d_j)$ или SK_j , где d_j – координата слоя по оси D ;
- $SD(k_z)$ или SD_z , где k_z – координата слоя по оси K ;
- $DK(s_i)$ или DK_i , где s_i – координата слоя по оси S .

Например, $SK(d_1)$ – слой, охватывающий предпроектный анализ для всех видов обеспечения и всех задач ТПП. Обозначение $SD(k_1)$ означает слой, в который входит методическое обеспечение всех этапов проекта для всех задач ТПП, а $DK(s_5)$ – слой для подсистемы проектирования технологических процессов. Слой охватывает все виды обеспечения этой подсистемы и все этапы ее разработки и внедрения. Тогда для соединения множества слоев можно использовать обозначение $S = S_1 \cup \dots \cup S_n$, означающее, что слой S составлен из слоев S_1, \dots, S_n . Таким образом, имеет место трехмерное пространство автоматизации, манипулируя которым, можно оценивать существующий уровень автоматизации ТПП и планировать стратегию создания и функционирования АСТПП.

Существующее состояние автоматизации ТПП характеризуется заполнением эксплуатационного слоя SK_6 . Каждая j -ая подсистема, находящаяся в эксплуатации, характеризуется вектором $\mathbf{V}(E_{6,j,1}, E_{6,j,7})$ в этом слое.

Для характеристики уровня автоматизации может быть предложен объемный коэффициент автоматизации K_a :

$$K_a = (n_f / n_s) \cdot 100\%,$$

где n_f – количество функционирующих автоматизированных подсистем (задач) ТПП; n_s – общее количество подсистем (задач) ТПП. В соответствии с [3; табл. 4 приложения 2] $K_a < 25\%$ соответствует низкому, K_a от 25% до 50% – среднему, а $K_a > 50\%$ – высокому уровню автоматизации ТПП [3].

Практика показывает, что в ТПП могут существовать автоматизированные подсистемы (задачи), находящиеся на различных стадиях проектирования и внедрения. На взгляд авторов, их также необходимо учесть при определении коэффициента автоматизации. По этой причине более точным является полный коэффициент автоматизации K_{pa} , определяемый исходя из всего пространства автоматизации:

$$K_{pa} = (n_z / n) \cdot 100\%,$$

где n_z – количество непустых элементов пространства автоматизации.

Анализ указанных коэффициентов показывает, что они могут сильно отличаться по величине. Например, если в ТПП конкретного предприятия нет автоматизированных задач, но в то же время спроектировано и готово к запуску в эксплуатацию большое количество автоматизированных подсистем ТПП, то $K_a = 0\%$, а K_{pa} может достигать 60–70%. Для согласования указанных коэффициентов введем коэффициент готовности G_a :

$$G_a = (n_p / n) \cdot 100\%,$$

где n_p – количество элементов ПА, входящих как компоненты автоматизированных подсистем (задач ТПП), которые еще разрабатываются и не эксплуатируются.

Коэффициент G_a дает возможность оценить ближайшие перспективы автоматизации ТПП конкретного предприятия. Если отдельные этапы проекта или виды обеспечения имеют различную важность, то для элементов ПА можно назначать различные веса, которые учитываются при их суммировании.

Применение метрик для оценки проектов по автоматизации ТПП

Рассмотрим способы использования пространства автоматизации. Можно выделить различные типы проектов при проведении работ по автоматизации ТПП, в том числе:

1. автоматизация решения отдельной задачи;
2. автоматизация группы задач для определенного этапа ТПП;
3. комплексная автоматизация ТПП.

Проект первого типа выполняется для автоматизации задачи, которая рассматривается как «узкое место» в технологической подготовке производства. В качестве примера можно привести разработку управляющих программ для изготовления сложных деталей на многокоординатном станке. В этом случае выполняется выбор САМ-системы, в наибольшей степени отвечающей специфике предприятия и изделиям, которые оно выпускает. В пространстве автоматизации этому типу проекта соответствует слой $DK(s_i)$ или DK_i , где s_i – задача, подлежащая автоматизации. Проекции этого слоя на плоскости DS и SK показаны на рис. 2.

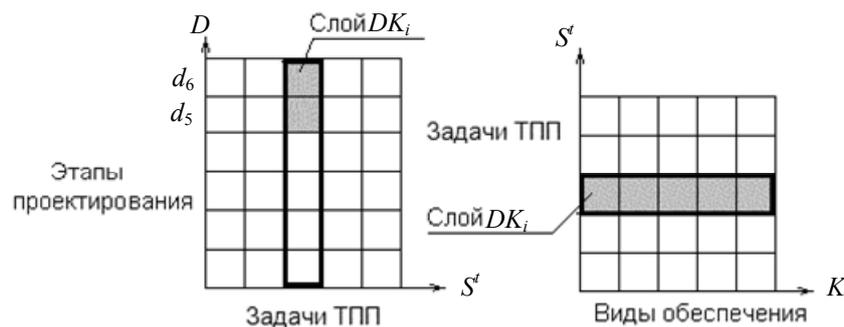


Рис. 2. Пространство автоматизация для проекта 1 типа

Как видно из рисунка, после приобретения готовой системы выполняется лишь внедрение (d_5) с последующей эксплуатацией системы (d_6). Такие проекты имеют относительно невысокую стоимость и могут выполняться для малых и средних предприятий. Однако в этом случае поддерживается традиция островной автоматизации ТПП со всеми присущими такому подходу недостатками, что в будущем может потребовать дополнительных усилий по информационной стыковке с другими задачами и подсистемами ТПП. Для таких проектов характерно относительно небольшое изменение коэффициентов K_a и K_{pa} .

Проекты второго типа предназначены для автоматизации подсистемы ТПП или комплекса задач, связанных с определенным этапом подготовки производства. В данном случае создается несколько автоматизированных рабочих мест, на которых решается комплекс взаимосвязанных задач. Характерный пример – САПР технологических процессов, включая расчеты режимов резания и норм времени, интегрированная с системой проектирования управляющих программ. В этом случае автоматизированные рабочие места руководителей и специалистов объединены вычислительной сетью. Согласованная параллельная работа позволяет обеспечить необходимое качество проектирования технологических процессов.

Такие проекты требуют тщательного предварительного анализа состава задач, их перераспределения по рабочим местам; после освоения и внедрения автоматизированная система возьмет на себя многие рутинные работы и приведет к изменениям организационной структуры. В связи с этим очень важен предпроектный анализ и анализ нормативно-справочной информации. Весьма трудоемким является процесс заполнения баз данных и знаний. Дополнительные затраты требуют подготовка персонала и отработка методики коллективной работы над проектом.

В пространстве автоматизации этому типу проекта соответствует соединение слоев:

$$S = DK_1 \cup \dots \cup DK_j \dots \cup DK_k,$$

где j – номера задач, которые автоматизируются в проекте. Проекция этого слоя на плоскость DS показана на рис. 3.

Проекты третьего типа направлены на комплексную автоматизацию ТПП. В компьютерную сеть объединяются задачи всех этапов ТПП, управление которыми выполняется с помощью PDM-системы.

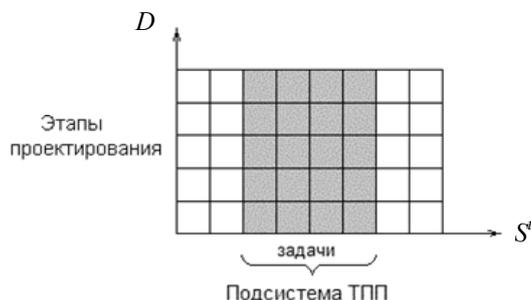


Рис. 3. Пространство автоматизация при проектировании подсистемы ТПП

Реализация третьего типа проекта требует весьма большого объема работ, при этом пространство автоматизации последовательно заполняется. Следовательно, этот тип проекта характеризуется весьма большими значениями вышеуказанных коэффициентов автоматизации. Так как требуются весьма значительные инвестиции в такие проекты, необходимо весьма серьезное обоснование экономической эффективности с планированием динамики изменения коэффициентов автоматизации.

Заключение

Описанная методика апробирована авторами при разработке и внедрении автоматизированных подсистем технологической подготовки производства. На основании этого предложены дальнейшие направления ее развития. Так как процесс автоматизации ТПП разворачивается во времени, то, сопоставляя по годам коэффициенты K_a , K_{pa} и G_a можно отслеживать текущее положение дел, динамику автоматизации и планировать стратегию дальнейшего развития ТПП. Однако многообразие вариантов совершенствования ТПП требует весьма трудоемкого анализа для выявления наиболее эффективных вариантов и определения допустимых рисков. Для системы автоматизированной технологической подготовки производства характерно наличие сильных информационных связей между подсистемами, поэтому даже при локальной автоматизации какой-либо задачи ТПП требуется проведение трассировки возможных изменений в задачах, связанных с заданной. Проведение трассировки может показать необходимость в более масштабных затратах, чем планировалось. В связи с этим дальнейшее развитие подхода к оценке уровня автоматизации ТПП авторы связывают с предложенной М.А. Курочкиным и Ю.М. Мадорской методикой формирования оценки изменений при эволюционном сопровождении автоматизированных систем управления предприятиями [4]. Методика предполагает коллективную работу проектировщиков над вновь возникающими требованиями и наличие функции трассировки этих требований.

Литература

1. Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И. Реинжиниринг и автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении. – СПб: Политехника, 2004. – 152 с.
2. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя: Пер. с англ. – М.: ДМК, 2000. – 432 с.
3. ГОСТ 23501.108-85. Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначения. – Введ. 01.01.1986. – М.: Госстандарт, 1986. – 15 с.
4. Курочкин М.А., Мадорская Ю.М. Проблема формирования оценки сложности изменений программного обеспечения при эволюционном сопровождении АСУП // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке. XV Международная научно-методическая конференция. – СПб, 2008. – С. 90–92.

Куликов Дмитрий Дмитриевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ddkulikov@ Rambler.ru

Яблочников Евгений Иванович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, eugeny@bee-pitron.spb.su

УДК 004.4'22:67.05

ОРГАНИЗАЦИЯ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА ВИРТУАЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

М.Я. Афанасьев, А.А. Грибовский

Рассматриваются особенности создания единого информационного пространства виртуального предприятия с учетом применения современных информационных технологий, а также многоагентная модель управления кластером.

Ключевые слова: мультиагентные технологии, виртуальное предприятие, единое информационное пространство.

Введение

Существует несколько определений виртуального предприятия, приведем наиболее полное из них [1]. Виртуальное предприятие – временная межпроизводственная кооперация ряда юридически независимых предприятий, которая:

- создается в короткий срок и поддерживается с помощью современных информационных технологий;
- путем интеграции возможностей участников разрабатывает и производит актуальную продукцию или услуги;
- обходится без новых юридических образований, которые заменяются гибкой координацией.

Как следует из данного определения, основой любого виртуального предприятия должно стать единое информационное пространство (ЕИП). Именно благодаря ЕИП возможно быстрое развертывание партнерской сети в кратчайшие сроки и с минимальными затратами денежных средств.

В данной работе будут рассмотрены особенности построения кластера, являющегося ядром будущего виртуального предприятия, с применением современных информационных технологий. Роль ЕИП в проектируемой системе будет выполнять программный продукт компании Dassault Systemes S. A – PDM-система ENOVIA-SmarTeam. Для управления работой виртуального предприятия будет применяться модель мультиагентного взаимодействия.

Виртуализация и облачные вычисления

Основными проблемами создания интегрированной среды виртуального предприятия являются высокая стоимость внедрения и владения, а также время, затраченное на проектирование, реализацию и введение в эксплуатацию программно-аппаратного комплекса поддержки ЕИП.

Для решения этих проблем в работе предлагается использовать технологии серверной виртуализации и облачных вычислений. Облачные вычисления – технология распределенной обработки данных, в которой компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как web-сервис. Данная технология предполагает наличие распределенного центра обработки данных (ЦОД), предоставляющего ресурсы виртуальных серверов за фиксированную абонентскую плату. Простейшей реализацией данной технологии является подход, получивший название SaaS (Software as a Service – программное обеспечение как услуга). Для еще большей минимизации затрат на создание ЕИП будет использоваться готовый к развертыванию интернет-сервер системы SmarTeam. Данный компонент является частью базовой поставки системы и практически не требует настройки.

В результате на первом этапе создания ЕИП виртуального предприятия будет создано ядро, предоставляющее базовые сервисы для работы с системой исключительно через Интернет-клиент. Бизнес-процессы, реализуемые на данном этапе, рассмотрены в работах [2, 3]. Отличительной особенностью ядра станет его полная децентрализованность и высокая доступность за счет встроенных в любую систему облачных вычислений механизмов резервирования данных и сервисов. При этом время, затраченное на полное развертывание системы, будет сводиться к времени установки и настройки серверных компонентов системы SmarTeam.

Существенное сокращение времени на первичное развертывание ЕИП позволит большее внимание уделить методологии работы будущего виртуального предприятия и тестированию работоспособности всех сервисов, а также ускорить переход ко второму этапу построения информационной среды виртуального предприятия – созданию виртуальной частной сети.

Виртуальная частная сеть

Виртуальная частная сеть (Virtual Private Network, VPN) – обобщенное название ряда технологий, позволяющих объединять несколько территориально-независимых физических локальных вычислительных сетей (ЛВС) в одну виртуальную сеть, используя при этом публичные каналы сети Интернет. При этом каждый узел вновь сформированной сети остается в определенной степени независимым (из-за наличия выхода в глобальную сеть), но также может обмениваться данными с другими узлами сети через защищенный туннель. Безопасность соединения обеспечивается за счет повсеместного использования технологий шифрования, что крайне важно именно для работы виртуального предприятия, ведь информация, передаваемая через каналы виртуальной частной сети, может содержать

коммерческую тайну одного из участников кооперации и использование публичных средств связи может оттолкнуть их от участия в партнерской деятельности.

Рассмотрим типовые варианты подключения участников кооперации к VPN кластера (рис. 1).

Крупное предприятие. На крупном предприятии обычно уже существует определенная сетевая инфраструктура. В связи с этим процесс интеграции крупного предприятия в структуру кластера должен начинаться с всестороннего анализа существующего компьютерного и телекоммуникационного оборудования предприятия. В результате этого анализа должно быть подготовлено экспертное заключение о возможности подключения предприятия к VPN. Если экспертное заключение положительно, то производятся работы по установке и настройке межсетевой экран, который соединит основной шлюз корпоративной сети предприятия с одним (при децентрализованной структуре – с несколькими) узлом VPN. Пуско-наладочные работы при этом редко занимают больше одной рабочей недели.

В случае отрицательного заключения предприятию могут быть делегированы свободные вычислительные мощности ядра кластера, а также улучшены существующие или созданы дополнительные (резервные) каналы связи. Подобные мероприятия обычно занимают не больше одного календарного месяца. После этого предприятие может подключиться к VPN сети и начать полноценно работать в рамках кооперации.

Среднее предприятие. Среднее по размерам предприятие обычно имеет в своем распоряжении небольшую ЛВС и выход в Интернет. Собственных же вычислительных мощностей у него, как правило, нет. По этой причине этап экспертной оценки можно пропустить, сразу выделив этому предприятию часть вычислительных мощностей ядра кластера и установив межсетевой экран для доступа к VPN. Все работы займут не более двух рабочих недель.

Малое предприятие. Малое предприятие обычно обладает крайне скромными компьютерными ресурсами. Обычно это несколько персональных компьютеров, имеющих доступ в Интернет, часто даже не объединенных в ЛВС. Устанавливать аппаратный межсетевой экран в данном случае экономически невыгодно. Подключение к VPN может быть осуществлено через так называемый программный клиент. Программный клиент устанавливается на те компьютеры, которые должны иметь доступ к ресурсам кластера. Установка и настройка при этом займет не больше одного рабочего дня.

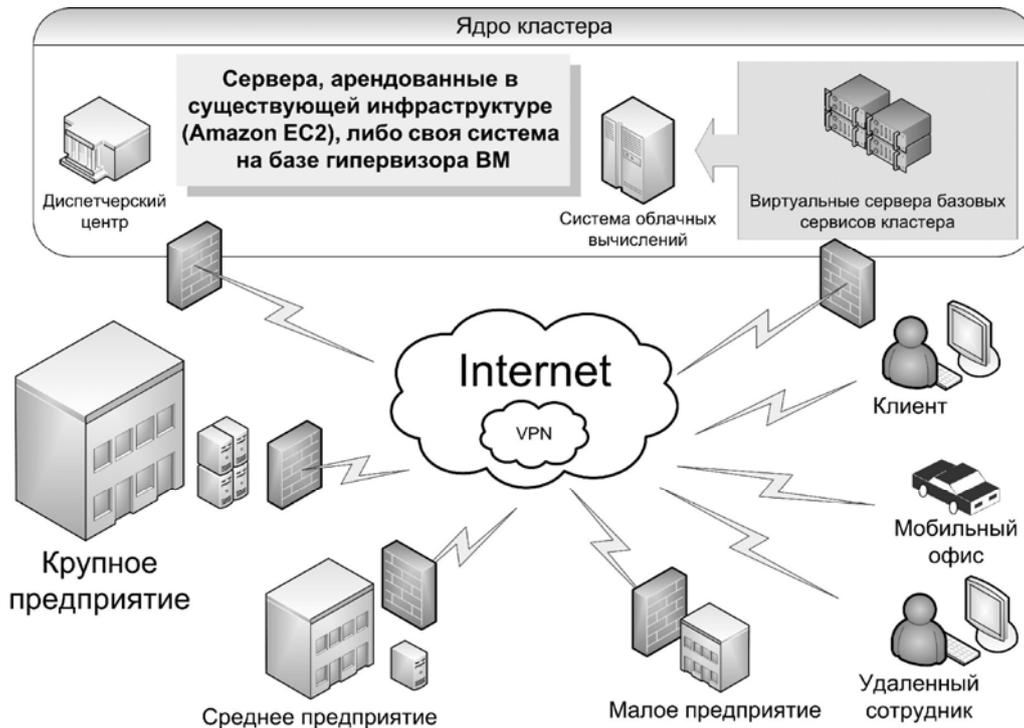


Рис. 1. Укрупненная структура кластера виртуального предприятия

Мобильный офис. Мобильный офис может создаваться в том случае, когда требуется временное подключение к виртуальному кластеру. Мобильный офис, по большому счету – это несколько мобильных компьютеров (ноутбуков или планшетов) и беспроводная точка доступа, позволяющая мгновенно объединить эти компьютеры в ЛВС и предоставить им доступ в глобальную сеть (как правило, используются технологии GPRS или Wi-Max), а также являющаяся межсетевым экраном VPN. Мобильный офис не требует настройки и конфигурирования и готов к работе сразу после включения

оборудования. Это особенно удобно для демонстрации возможностей виртуального кластера и работы в непригодных помещениях (например, при подключении к кластеру нового партнера или нового офиса, пока не оборудованного средствами связи).

Удаленный сотрудник и клиент. Удаленный сотрудник и клиент по определению не могут иметь полного доступа к ресурсам виртуального кластера. Для их подключения может использоваться только программный клиент доступа к VPN. При этом его настройки должны максимально ограничивать права пользователя, позволяя ему, например, работать только в режиме чтения, либо помещать все изменения, сделанные в режиме удаленной работы, в специальную изолированную область. После проверки этой области уполномоченным лицом изменения могут быть внесены в базовую систему.

Основные функции ядра кластера

Обеспечение доступа к базовым сервисам SmarTeam. К базовым сервисам PDM-системы SmarTeam относятся следующие подсистемы:

- сервер управления базами данных (СУБД);
- менеджер конфигурации и диспетчер сессии SmarTeam;
- мультиформатный просмотрщик;
- сервер лицензий;
- сервер управления бизнес-процессами;
- web-службы SmarTeam;
- балансировщик нагрузки системы.

Организация единого файлового хранилища. Единое файловое хранилище (Vault-сервер, в терминах SmarTeam) представляет собой распределенный децентрализованный репозиторий с возможностью отслеживать жизненный цикл каждого помещенного в него файла, работающий с так называемыми ревизиями (или, как их еще иногда называют, – версиями). Каждый раз, когда пользователь хочет произвести какие-либо действия с тем или иным файлом, он перемещает его в свое локальное хранилище (создается рабочая копия), при этом файл в репозитории блокируется. После редактирования файл возвращается в хранилище, ему присваивается новый номер ревизии, а блокировка снимается. Для некоторых типов файлов можно создавать рабочую копию без блокировок. При этом, если два пользователя одновременно попытаются вернуть в хранилище один и тот же файл, то вместо создания новой версии запускается арбитр, который пытается разрешить коллизии, возникшие при попытке объединить два разных файла в одну ревизию. Репликации хранилища осуществляются на уровне операционной системы.

Создание системы резервного хранения. В процессе работы виртуального кластера помимо файлов, непосредственно связанных с деятельностью виртуального предприятия, создается большое количество различных файлов. Это могут быть образы дисков виртуальных серверов, конфигурации, журналы учета и т.д. Все эти данные требуют регулярного резервного копирования, поэтому, кроме единого файлового хранилища, в структуру кластера должен быть также включен еще и сервер резервирования. Данный сервер, как правило, создается на базе UNIX-подобной системы и использует файловую систему с полным контролем над физическими и логическими носителями, например, ZFS.

Обеспечение доступа к корпоративной почте. Корпоративная почтовая система внутри кластера виртуального предприятия создается на базе сервиса SmartBox, являющегося составной частью сервера управления бизнес-процессами. К функциям корпоративного почтового сервера относятся:

- обработка деловой переписки сотрудников и клиентов;
- рассылка уведомлений, формируемых системой управления бизнес-процессами;
- интеграция с внешними почтовыми серверами (работа с почтой).

Мониторинг работы участников кластера. Отслеживание всех видов деятельности участников виртуального кластера осуществляется с помощью специализированного инструмента – Job Server. Данная система ведет учет времени, затрачиваемого на те или иные работы, активно взаимодействует с подсистемой формирования уведомлений, а также дает возможность использовать электронные цифровые подписи.

Мультиагентная модель взаимодействия

Мультиагентная система (МАС) – это система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами. При помощи МАС можно моделировать сложные системы, в которых агенты могут использоваться для решения одной или нескольких задач. Агенты могут взаимодействовать друг с другом косвенно (путем воздействия с окружающей средой) либо непосредственно (через общение и ведения переговоров). Для принятия решения агенты могут сотрудничать или конкурировать в зависимости от своих собственных интересов [4].

Каждый агент по своей сути является автономной сущностью, поэтому МАС может считаться полностью децентрализованной. Описанная же выше система организации кластера виртуального предприятия имеет централизованное ядро, тесно связанное с СУБД, т.е. является классической клиент-серверной системой. Для достижения наивысшей гибкости и мобильности ЕИП виртуального кластера должно объединять в себе достоинства обоих подходов (рис. 2).

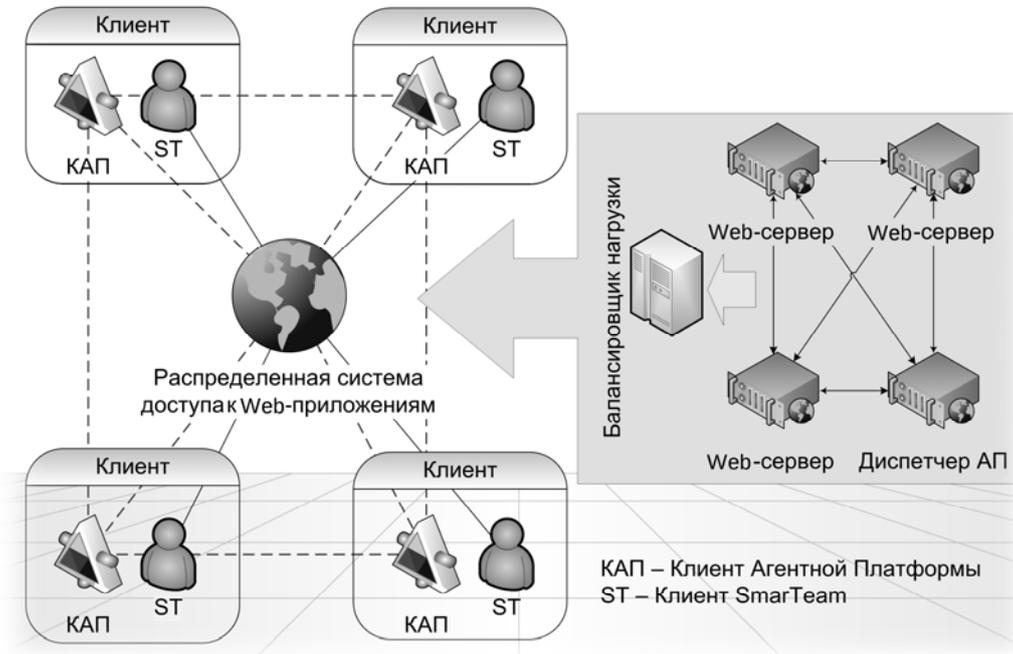


Рис. 2. Взаимодействие агентной платформы и ЕИП на прикладном уровне

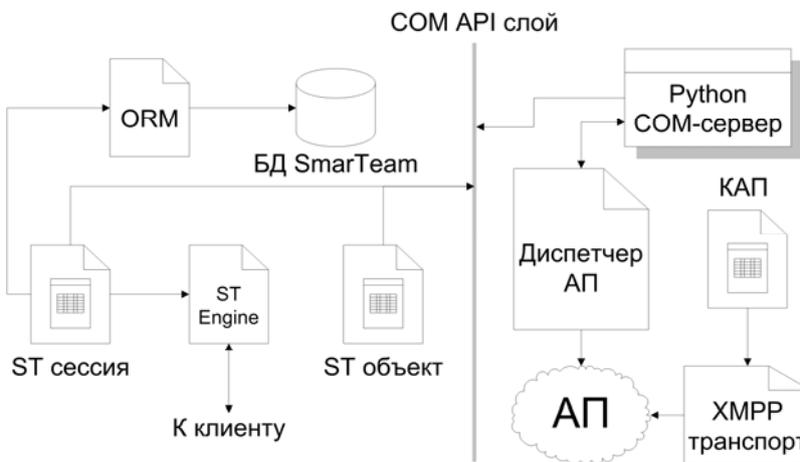


Рис. 3. Схема работы плагина для Интернет-клиента

Для взаимодействия агентной платформы (АП) и ЕИП виртуального предприятия используется специальная надстройка над API системы SmartTeam. Модуль взаимодействия создается на языке Python и имеет возможность получать данные о любом объекте системы, а также работать с данными сессии SmartTeam.

На текущем этапе развития системы и клиент агентной платформы (КАП), и модуль взаимодействия со средой SmartTeam реализованы в виде отдельных приложений (сценариев), в то время как вся работа с PDM-системой осуществляется через Интернет-клиент.

В дальнейшем планируется отказаться от сторонних компонентов и интегрировать КАП непосредственно в Интернет-клиент в виде плагина. При этом установка этого дополнения может происходить автоматически (в случае согласия пользователя) при регистрации в системе. Общая схема работы такой интеграции показана на рис. 3.

Заключение

На сегодняшний день создание быстро внедряемых высокоинтегрированных коллаборативных систем, позволяющих быстро создавать гибкую партнерскую сеть виртуального предприятия, невозможно без применения современных информационных технологий. Кластеры должны создаваться внутри облачных сервисов и взаимодействовать с партнерами через Интернет. Часть функций по управлению виртуальным кластером должна быть передана интеллектуальным агентам, взаимодействующим между собой, а также внутри специализированной агентной платформы. Для повышения гибкости и отказоустойчивости виртуального кластера необходимо создать систему, удовлетворяющую, с одной стороны, принципам децентрализованности, а с другой – интеграции всех базовых сервисов. На данный момент создается учебный прототип ядра виртуального кластера, а также дорабатывается структура системы взаимодействия и архитектура виртуальной частной сети.

Литература

1. Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И. Информационные технологии в проектировании и производстве. – СПб: Политехника, 2008. – 304 с.
2. Афанасьев М.Я., Саломатина А.А., Алешина А.Е., Яблочников Е.И. Применение многоагентных технологий для реализации системы управления виртуальным предприятием // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5. – С. 105–110.
3. Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А. Организация технологической подготовки производства в распределенной среде // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 6. – С. 12–15.
4. Bellifemine F., Caire G., Greenwood D. Developing Multi-Agent Systems with JADE. – John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 286 p.

Афанасьев Максим Яковлевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, ichiro.kodachi@gmail.com

Грибовский Андрей Александрович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, grian-drey@yandex.ru

УДК 159.9.62

АДАПТИВНОСТЬ В ТРЕНАЖЕРАХ

С.Ф. Сергеев

Приводится обзор современных подходов к формированию адаптивных режимов в тренажерах операторов эргатических систем. Показаны ограничения классической методологии проектирования адаптивных тренажеров, использующей критерии адаптации по эффективности выполнения учебных задач. Предложены подходы к выбору способов адаптации, учитывающие процессы самоорганизации обучающей среды.

Ключевые слова: адаптация, взаимоадаптация, адаптивные тренажеры, способы адаптации, обучающие среды.

Введение

Технологический прогресс в области сбора, обработки и представления информации позволяет создать тренажерные системы с высокой степенью автоматизации процессов управления обучением, обеспечивающие погружение обучаемого в среду с управляемыми параметрами. Появляется возможность проводить подготовку операторов эргатических систем в реальном времени в соответствии с ходом процесса усвоения и отработки навыков, с учетом объективной сложности учебных заданий для каждого конкретного обучаемого. Возникли предпосылки к созданию адаптивных тренажерных систем, в которых процесс управления обучением автоматизирован [1].

Классические модели адаптивного обучения

В соответствии с ГОСТ 26387-84 адаптивный тренажер – это «тренажер, обеспечивающий автоматическую оптимизацию управления процессом подготовки человека-оператора с учетом скорости и качества выполнения им учебных задач» [2]. Это узкое техническое определение, вводящее критерии адаптации только как функцию поведения ученика в зоне учебных задач. При этом ученик воспринимается как «черный ящик», внутренние параметры которого скрыты от наблюдателя, но изменяются в зависимости от внешнего воздействия среды обучающей системы. Это довольно ограниченное техническое понимание свойств человека, являющегося биологической обучающейся системой, реализующей когнитивные функции. Истоки данных взглядов содержатся в работах по программируемому обучению, проводившихся в рамках методологической схемы бихевиоризма «стимул–реакция» [3]. Обучение в ней рассматривается как функция информационного взаимодействия когнитивной системы ученика и обучающей машины. Большинство обучающих систем в настоящее время активно использует парадигму бихевиоризма, что, однако не исчерпывает проблему адаптивных тренажерных систем. Кроме того, данный подход не позволяет создавать обучающие системы для подготовки операторов, работающих в условиях априорной неопределенности. Любые стандартные задачи, предлагаемые в тренажерах, могут привести к стереотипам, мешающим профессиональной деятельности.

При синтезе адаптивных тренажеров как систем адаптивного информационного взаимодействия решаются следующие основные проблемы:

- исследование закономерностей стохастической детерминации поведения человека;
- регистрация, качественный и количественный анализ факторов и критериев сложности решения мыслительных и перцептивных задач, выбор оптимальных моделей, методов и средств адаптации структуры и средств взаимодействия в нормальных и экстремальных условиях;
- разработка физических, математических, биологических и других моделей адаптивного взаимодействия;
- исследование психологических закономерностей протекания мыслительных, мнемических и перцептивных процессов в условиях интенсивного информационного взаимодействия [4].

Большинство существующих адаптивных тренажеров построено с использованием обратной связи вида «результат – изменение параметров задачи». Накапливая данные об уровне подготовки оператора, адаптивный тренажер данного вида позволяет подобрать метод обучения и способ подачи стандартных учебных ситуаций, обеспечивающие требуемый уровень профессиональной подготовки. Однако этот способ формирования навыков и умений не учитывает внутреннюю активность и избирательность когнитивной системы ученика, его прошлый опыт и свойства личности. Обучение может быть более эффективным при других схемах обучения, использующих в качестве критериев адаптации индивидуальные стили учебной деятельности [5] и когнитивные особенности обучаемых [6].

Психофизиологическая и поведенческая адаптации

Варианты обучающих программ могут различаться по параметрам адаптации (адаптивным переменным), наиболее популярные из которых можно свести в две большие группы: психофизиологические показатели и показатели обучаемости. В тренажерах возможна адаптация по параметрам информационного обмена – темпу, частоте подачи информации, по ее структуре [1, С. 47].

Приведенные способы адаптации являются техническими реализациями метода биологической обратной связи. Такие формы адаптации возможны только для ограниченного класса тренажеров – для подготовки операторов сенсомоторного профиля.

Теоретически адаптивные тренажеры являются наиболее эффективным средством профессиональной подготовки. Они позволяют проводить обучение оператора при высоком уровне его мотивации, в наиболее короткие сроки и в условиях, максимально приближенных к реальным условиям деятельности. Однако в настоящее время адаптивных тренажеров, учитывающих изменение обучающей функции в зависимости от состояния когнитивной системы оператора и его опыта, практически не существует.

Адаптация и взаимоадаптация

Помимо вышеуказанных технико-технологических проблем решение задачи создания адаптивных тренажеров сдерживается отсутствием работ, в концептуальном и методологическом планах, отражающих специфику адаптации и взаимной адаптации биологических и технических систем.

Понятие «адаптация», используемое в технических системах, отличается от понятий адаптации человека и его психофизиологической системы к окружающей среде и среде опыта, принятых в физиологии и психологии.

Некоторые авторы высказывают сомнения в необходимости излишне широкого толкования понятия адаптации применительно к психологии человека, включенного в профессиональную деятельность в составе эргатических и социальных систем [7, 8].

Понятие «взаимоадаптация» широко используется в психологии при описании отношений между людьми и свидетельствует о взаимных изменениях субъектов, учитывающих свойства друг друга для достижения некоторого взаимовыгодного баланса. В техническом плане можно говорить о взаимоадаптации человека и искусственной интеллектуальной среды, рассматриваемых как активных деятелей, включенных во взаимодействие, каждый из которых достигает своих целей.

Очевидно, что взаимоадаптация представляет собой интерактивный циклический процесс, в котором участники, образуя единую систему, являются независимыми друг от друга агентами, в отличие от адаптации, основанной на зависимости адаптирующейся системы от условий, к которым система адаптируется. Адаптация и взаимоадаптация могут сосуществовать одновременно как параллельные процессы.

В.Ф. Венда, рассматривая отличия понятия взаимоадаптации от таких понятий, как адаптация, взаимодействие, взаимовлияние, взаимосвязь и других, выделяет три основные группы различий. По его мнению, взаимоадаптация:

1. акцентирует внимание на изменениях, которые претерпевают объекты, становясь компонентами системы, на закономерностях этих изменений в ходе становления, развития, существования, трансформаций структур системы;
2. отвергает тенденции, ведущие к накоплению непримиримых противоречий;
3. направлена на максимальное раскрытие индивидуальных способностей, компенсацию психофизиологических недостатков, учет интересов и устремлений личности [9, С. 6].

В предложенной В.Ф. Вендой трансформационной теории обучения рассматривается развитие нескольких систем (одна из которых – ученик) и порождение новых их состояний без разрушения предыдущих до состояния хаоса. Существование и развитие живой системы является процессом взаимной опережающей многоуровневой адаптации компонентов системы между собой и системы с внешней средой [9, С. 26].

Психическая адаптация

Результаты исследований в области психологии произвольной сознательной регуляции и адаптации субъекта к различным профессиональным и обучающим средам отражены в понятийном базисе практически всех отраслей психологической науки. Наиболее подробно они представлены в трудах известных советских и российских ученых в области физиологии, психологии труда, общей и инженерной психологии, таких как Б.Г. Ананьев, П.К. Анохин, М.Я. Басов, Ф.Б. Басин, В.А. Бодров, Н.А. Бернштейн, А.В. Брушлинский, Л.М. Веккер, П.Я. Гальперин, Н.Д. Гордеева, Л.Г. Дикая, А.Л. Журавлев, Г.М. Зарковский, В.П. Зинченко, Т.П. Зинченко, О.А. Конопкин, Б.Ф. Ломов, В.И. Медведев, Г.С. Никифоров, А.А. Обознов, Б.В. Овчинников, В.А. Пономаренко, А.А. Смирнов, Г.В. Суходольский.

Следствием и важным результатом их научной деятельности явилось появление широко представленной в отечественной науке формы научного мышления, основанной на физиологических и материа-

листических представлениях о процессах регуляции и адаптации в живых, наделенных психикой, организмах. Это сильно повлияло на практику создания эргатических систем, переведя их проектирование в инженерную плоскость.

Среди исследований на эту тему можно особо выделить работы Ю.А. Александровского [10], В.И. Медведева [11, 12], Г.А. Балла [13], А.А. Налчаджяна [14], Ф.Б. Березина [15], В.А. Бодрова [16], Л.Г. Дикой [17], А.Л. Журавлева [18].

В данных работах дается предельно широкое толкование понятия психической адаптации. Видимо, это связано с тем, что термин «адаптация» хорошо сопрягается с множеством психологических и бытовых понятий, легко образуя различные смысловые конструкции («функциональная система психической адаптации», «целостная индивидуальная система адаптационной активности», «адаптационный потенциал личности», «адаптирующаяся личность» и т.д.).

Адаптация отражает отношения и связи между организмом и средой. Среда рассматривается в широком смысле, включая внутреннюю среду организма. Отличие регуляторных процессов от процессов адаптации с точки зрения системного подхода заключается в межсистемном интегральном характере последних. Л.Г. Дикая считает, что «содержательно процесс адаптации представляет собой активное формирование (осознанное или неосознаваемое) субъектом своей стратегии и способов овладения ситуацией на разных уровнях регуляции поведения, деятельности, состояния» [17, С. 39]. В.А. Бодров рассматривает адаптацию как «системный ответ организма и психики на длительное и многократное воздействие факторов среды, связанное с перестройкой механизмов гомеостатической регуляции, формированием функционального обеспечения жизни и деятельности в соответствии с новыми, измененными условиями среды» [16, С. 43]. Подчеркивается представление об адаптации как морфофункциональном динамическом процессе системной регуляции организма при воздействии измененных условий внешней и внутренней среды.

Адаптацию определяют как состояние и как процесс. В состоянии адаптации потребности индивида и требования среды полностью удовлетворены. Это состояние гармонии между индивидом и средой. Однако адаптация понимается не только как процесс и состояние. А.Л. Журавлев считает, что «...адаптация – базовый процесс, состояние и свойство психики» [18]. Многие специалисты описывают адаптационную систему личности как многоуровневую [19].

Ф.Б. Березин выделял три уровня: психофизиологический, собственно психический, социально-психологический [15]. Условно процессы адаптации можно отнести к психофизиологическому уровню, состояния адаптации – к собственно психическому уровню, адаптивные свойства личности – к социально-психологическому уровню.

Регуляция психических состояний при обучении может рассматриваться как адаптация. Для объяснения многообразия поведения человека в обучении адаптационной модели недостаточно. Особенно это касается взаимодействия человека с культурной средой.

Понятие психической адаптации – это перспективный ресурс для создания адаптивных алгоритмов обучения, хотя его достаточно сложно использовать при создании адаптивных тренажеров в силу высокой неопределенности и качественного характера процедур измерения и интерпретации. Однако некоторые опросные методы для оценки уровня психической адаптации могут быть использованы в адаптивных контурах тренажеров, отражающих изменение психического состояния в процессе обучения.

Биологическая адаптация

В широком смысле биологическая адаптация – это любое структурное, функциональное или поведенческое изменение в организме, повышающее его жизнеспособность. Организм живого существа адаптирован по определению. Его взаимодействие с окружающей средой состоит в большей или меньшей активности адаптационных систем (нервной, эндокринной, опорно-двигательной, сердечно-сосудистой, иммунной), которые обеспечивают удержание гомеостатических констант внутренней среды (газов, ионов и глюкозы в крови) в пределах, совместимых с жизнью.

Человеку свойственны четыре типа обучения: неассоциативное, ассоциативное, когнитивное и рассудочное [20]. На их основе формируется система поведенческих стереотипов, обеспечивающая реализацию задачи поддержания жизнедеятельности. Каждая из форм может служить основой для обучающих алгоритмов, реализуемых в обучающей среде, возникающей при обучении на тренажере.

Средовая адаптация

Все многообразие поведенческой активности человека представлено в виде следующих четырех типов «эволюционно стабильной стратегии поведения» [21]:

1. агонистическое поведение, связанное с конфликтами; оно может проявиться и в виде аутоагрессии;
2. кооперативное поведение, направленное на объединение усилий к достижению целей с наименьшими потерями;

3. альтруистическое поведение, связанное с добровольной утратой индивидом некоторых жизненных преимуществ ради повышения общей приспособленности всего сообщества;
4. эгоистическое поведение, связанное с односторонним накоплением жизненных преимуществ; иначе говоря, «поведение выживания».

Вполне вероятно, что адаптация к социуму среды обучения представляет в общем случае компромисс этих четырех принципиальных стратегий. Сценарий среды обучения адаптивного тренажера может использовать поведенческие особенности обучаемого, формируя требуемую историю жизни в среде.

Перспективная методологическая схема обучения реализуется в средоориентированных технологиях [22]. Тренажер в них можно определить как организационно-техническую систему, создающую в обучаемом искусственную обучающую среду, деятельность в которой приводит к формированию у обучаемого требуемого уровня профессиональной компетенции [23]. В данном определении используется постклассическое содержание понятия «обучающая среда». Это, в первую очередь, психологическое понятие, а не физическая реальность и техническое окружение, в котором работает оператор. Обучающая среда не является простой имитацией окружающей обстановки или алгоритмов работы человеко-машинной системы. Она содержит в своей основе психологический конструкт, возникающий в операторе в специально организованных (с учетом психологии обучения и поведения человека) условиях. В формировании данного конструкта значительную роль играет опыт обучающегося и контекст, в котором происходит обучение. Все средоориентированные тренажеры являются адаптивными тренажерами, так как они используют адаптацию обучаемого к среде обучения.

Постклассическая эргономика тренажеростроения основана на следующих взглядах на понятия «среда», «обучающая среда».

1. Среда эргатической обучающей системы является продуктом конструирующей деятельности психики человека-оператора и не может быть рассмотрена вне ее психического содержания.
2. Среда отражает феномен динамической целостности циклически формирующихся цепей отношений человека с физической и социальной реальностью в процессе обеспечения его жизнедеятельности. Среда выступает перед субъектом одновременно в виде субъективной реальности и как внешняя предметная, объективная структура мира, в котором действует субъект.
3. Обучающая среда в содержательном плане возникает всегда как динамический процесс формирования сети отношений в субъекте обучения, в который им лично (не всегда осознанно) избирательно вовлекаются самые разнообразные элементы внешнего и (или) внутреннего окружения с целью обеспечения: аутопоэзиса организма, стабильности личности и непрерывности ее истории.

Средоориентированный подход эффективен при использовании технологии виртуальной реальности, позволяющей менять любые параметры среды обучения в реальном времени [24], что позволяет реализовать любые схемы адаптации, в том числе полимодальную взаимоадаптацию к среде обучения.

Техническая адаптация в тренажерных системах

Понятие адаптации в техническом (инженерном) смысле связано с изменением параметров регуляторов и средств представления информации в зависимости от текущей ситуации и влияния среды. Это способность системы сохранять эксплуатационные показатели в заданных пределах при изменениях условий функционирования. Тренажер как адаптивная система может быть самонастраивающимся и самоорганизующимся. В первом случае изменение внешней среды (вида и содержания деятельности обучаемого) ведет к изменению параметров и способа функционирования тренажера, во втором случае изменяется структура тренажера.

Заметим, что в тренажере, как обучающей системе, различают два типа адаптивности. Это адаптивность структуры тренажера как технического устройства (режимная или конструктивная адаптивность) и дидактическая адаптивность. В первом случае технические устройства тренажера адаптируются под внешние сигналы, изменяя режимы функционирования или математическую модель тренажера, а во втором, подразумевается «автоматическое изменение учебно-методического обеспечения тренажера в зависимости от предшествующего опыта обучения, уровня обученности или этапа обучения» [25, С. 45]. Авторы дают следующее определение адаптивного тренажера: это «программно-техническое средство профессиональной подготовки персонала, обеспечивающее автоматическую оптимизацию управления процессом обучения при изменении свойств объекта управления и уровня обученности оператора» [25, С. 46].

Адаптивными свойствами могут обладать не только тренажерные системы в целом, но и их отдельные узлы. Так, например, используются адаптивные системы визуальной обстановки, которые формируют и перераспределяют визуальную информацию для оператора в соответствии с его возможностями и потребностями воспринимать эту информацию (от положения головы, зрачков глаз, размещения сюжетно-важных участков изображения и т.д.) [26]. В работе И.В. Курочкина с соавторами для оценки и контроля обученности человека оператора используется экспериментальная оценка параметров его адаптивной модели [27].

Следует заметить, что проблемы технической адаптации в обучающих тренажерных комплексах постепенно уходят в прошлое. Современные технологии проектирования, основанные на компьютерном управлении и моделировании, переходят в область программного проектирования, для которого технологические ограничения несущественны. Важно создать искусственный мир, обладающий обучающими свойствами, жизнедеятельность в котором формировала бы требуемые комплексы профессионально-важных качеств. Эта задача отличается от классического подхода формирования методик обучения и требует дополнительной, серьезной научной проработки.

Заключение

Проблема адаптивности является центральной при создании технических средств профессиональной подготовки операторов эргатических систем. Она отражает общее свойство живого к приспособлению путем выработки новых когнитивных и исполнительных структур, и лежит в основе всех методов обучения. Практически все параметры учебной задачи могут быть использованы для включения и совершенствования тех или иных профессионально важных функций, знаний и умений и навыков человека.

Рекурсивный характер обучения связан с циклическими процессами самовоспроизведения, действующими в организме человека, что позволяет выделить повторение в качестве одного из основных методов и методологических принципов обучения в искусственных средах.

Искусственная среда обучения в тренажере, представленная ученику в виде мира деятельности, должна включать все типы обучения, ведущие к появлению эффективного профессионального поведения.

При создании среды обучения в тренажере необходимо учитывать эффекты самоорганизации, возникающие в системе «среда обучения – ученик». Важно обеспечить активность ученика в процессах включения в среду обучения, что обеспечивает в дальнейшем деятельность в профессиональной среде.

Литература

1. Соколов В.Н. Адаптивные тренажерные системы: проектирование и оценка. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 160 с.
2. ГОСТ 26387-84. Система «человек–машина». Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2006. – 6 с.
3. Крэм Д. Программированное обучение и обучающие машины. – М.: Мир, 1965. – 274 с.
4. Инженерная психология / Под ред. Б.Ф. Ломова, В.Ф. Рубахина, В.Ф. Венды. – М.: Наука, 1977. – 302 с.
5. Сергеев С.Ф. Инструменты обучающей среды: стили обучения // Школьные технологии. – 2010. – № 5. – С. 19–27.
6. Сергеев С.Ф. Инструменты обучающей среды: интеллект и когнитивные стили // Школьные технологии. – 2010. – № 4. – С. 43–51.
7. Журавлев А.Л., Купрейченко А.Б. Самоопределение, адаптация и социализация: соотношение и место в системе социально-психологических понятий // Психология адаптации и социальная среда: современные подходы, проблемы, перспективы. – М.: Институт психологии РАН, 2007. – С. 62–95.
8. Реан А.А., Кудашев А.Р., Баранов А.А. Психология адаптации личности. – М.: Прайм-Еврознак, 2008. – 479 с.
9. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
10. Александровский Ю.А. Состояния психической дезадаптации и их компенсация. – М.: Наука, 1976. – 272 с.
11. Медведев В.И. О проблеме адаптации // Компоненты адаптационного процесса. – Л.: Наука, 1984. – С. 3–16.
12. Медведев В.И. Адаптация человека. – СПб: Институт мозга человека РАН, 2003. – 584 с.
13. Балл Г.А. Понятие адаптации и его значение для психологии личности // Вопросы психологии. – 1986. – № 1. – С. 92–100.
14. Налчаджян А.А. Социально-психическая адаптация личности (формы, механизмы и стратегии). – Ереван: АН Арм. ССР, 1988. – 263 с.
15. Березин Ф.Б. Психическая и психофизиологическая адаптация человека. – Л.: Наука, 1988. – 295 с.
16. Бодров В.А. Психологические механизмы адаптации человека // Психологическая адаптация и социальная среда: современные подходы, проблемы, перспективы. – М.: Институт психологии РАН, 2007. – С. 42–61.
17. Дикая Л.Г. Адаптация: методологические проблемы и основные направления исследований // Психологическая адаптация и социальная среда: современные подходы, проблемы, перспективы. – М.: Институт психологии РАН, 2007. – С. 17–41.

18. Журавлев А.Л., Купрейченко А.Б. Самоопределение, адаптация и социализация: соотношение и место в системе социально-психологических понятий // Психология адаптации и социальная среда: современные подходы, проблемы, перспективы. – М.: Институт психологии РАН, 2007. – С. 62–95.
19. Вассерман Л.И., Беребин М.А., Косенков Н.И. О системном подходе в оценке психической адаптации // Обзорные психиатрии и медицинской психологии им. В.М. Бехтерева. – 1994. – № 3. – С. 16–25.
20. Батуев А.С. Физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем: Учебник для вузов. – 3-е изд. – СПб: Питер, 2008. – 318 с.
21. Эрман Л., Парсонс П. Генетика поведения и эволюция: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 566 с.
22. Сергеев С.Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. – М.: Народное образование, 2009. – 432 с.
23. Сергеев С.Ф. Методология проектирования тренажеров с иммерсивными обучающими средами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1(71). – С. 109–114.
24. Сергеев С.Ф. Эргономическое проектирование виртуальных тренажеров // ЧФ: Проблемы психологии и эргономики. – 2011. – № 3 (58). – С. 99–105.
25. Магид С.И., Загретдинов И.Ш., Архипова Е.Н., Музыка Л.П. Проблемы современного энергетического тренажеростроения через призму терминологии // Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2007. – № 1. – С. 35–51.
26. Белоусов Б.И., Пустыльников В.С. Адаптивные системы имитации визуальной обстановки (ИВО) тренажеров транспортных средств // Психологические аспекты тренажеростроения. Ч. 1. – Ереван, 1984. – С. 72–74.
27. Курочкин И.В., Царьков А.С., Шляхтин Г.С. Тренажер для оценки параметров адаптивной модели оператора как показателей уровня его обученности // Психологические аспекты тренажеростроения. Ч. II. – Ереван, 1984. – С. 30–33.

Сергеев Сергей Федорович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор психологических наук, зав. лабораторией, ssfpost@mail.ru

УДК 004.415.53:004.832.23

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕСТОВ ДЛЯ ОЛИМПИАДНЫХ ЗАДАЧ ПО ТЕОРИИ ГРАФОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВОЛЮЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ

М.В. Буздалов

Предлагается метод автоматизированной генерации тестов для олимпиадных задач по теории графов, предназначенный для выявления неэффективных решений. Метод основан на использовании эволюционных стратегий. Описывается использование предлагаемого метода для генерации новых тестов к олимпиадной задаче из Интернет-архива acm.timus.ru.

Ключевые слова: эволюционные стратегии, олимпиады по программированию, тестирование.

Введение

В мире проводится большое число олимпиад по программированию как для студентов [1, 2, 4, 5], так и для школьников [3, 6]. На этих олимпиадах участникам предлагается решить одну или несколько задач. Решением задачи является программа, написанная на одном из широко используемых языков программирования – например, в соревновании ACM ICPC разрешено использование языков C, C++ и Java [7]. В работе [8] описано, как решаются олимпиадные задачи, а в [9] описан подход к эффективной командной работе на олимпиаде.

Проверка корректности решения задачи, как правило, производится автоматически, путем запуска решения на одном или нескольких наборах входных данных – тестах – и проверки соответствия выходных данных решения условию задачи. Тесты одинаковы для всех решений конкретной задачи, неизвестны участникам и не изменяются в течение всей олимпиады. Если хотя бы на одном тесте программа работала более определенного времени, использовала больше оперативной памяти, чем разрешено, или завершилась с ошибкой, то решение признается некорректным [7]. По этой причине качество тестов непосредственно влияет на уровень проведения олимпиады.

Описание процесса генерации тестов для олимпиадных задач, а также мотивация автоматизации поиска тестов приведены в работе [10].

Описание предлагаемого подхода

В настоящей работе рассматривается генерация тестов, на которых неэффективные решения работают как можно дольше. Качество таких тестов может характеризоваться величинами с большим диапазоном значений, что делает поиск требуемого теста проще.

При генерации теста против неэффективного решения предполагается, что такое решение уже имеется. Это допущение в некотором смысле противоречит цели получаемых тестов – выявлять различные неэффективные решения, реализуемые участниками с применением различных, зачастую непредсказуемых и нестандартных идей. Тем не менее, тест, сгенерированный против некоторого решения, обычно оказывается «фатальным» для достаточно большого множества неэффективных решений. При разумном выборе решений, против которых генерируются тесты, возможно «покрыть» почти все неэффективные решения.

При описываемом подходе для поиска теста применяется эволюционная стратегия [11]. Применение вероятностных алгоритмов, таких как эволюционная стратегия, для поиска теста оправдано тем, что определение сложности теста для конкретного решения, а, следовательно, аналитический поиск сложного теста является, по теореме Райса [12], алгоритмически неразрешимой задачей. Кроме того, при генерации теста ставится задача найти не наиболее сложный тест, а достаточно сложный для того, чтобы отфильтровать неэффективные решения.

Для применения эволюционной стратегии необходимо разработать подходящий способ кодирования теста и оптимизируемую функцию – функцию приспособленности теста.

Способ кодирования теста зависит от задачи, для которой генерируются тесты. Он должен эффективно учитывать ограничения, заданные в условии задачи. Для повышения эффективности подхода следует проанализировать возможные способы кодирования и выбрать тот из них, который обеспечивает большую долю потенциально эффективных тестов.

Большую трудность составляет выбор функции приспособленности. В качестве функции приспособленности нельзя выбирать время работы решения на тесте, поскольку это время может случайным образом изменяться в зависимости от загруженности различных узлов компьютера, а также имеет низкую точность измерения.

Выбор в качестве функции приспособленности числа выполненных инструкций кода решает описанные выше проблемы. Однако во многих случаях то, что функция приспособленности пропорциональна времени работы программы, может привести к тому, что алгоритм оптимизации сделает выбор в пользу «больших» тестов, игнорируя «качественные», иными словами, предпочтет количество качеству.

В связи с этим предлагается проанализировать решение, против которого требуется сгенерировать тест, и модифицировать его исходный код так, чтобы в процессе работы решения вычислялась та характеристическая величина, которая будет использована в качестве функции приспособленности. Эта величина может лучше выражать качество теста, что ускоряет процесс поиска.

Применение подхода к олимпиадной задаче «Work for Robots»

Для апробации описываемого подхода в условиях реальных олимпиадных задач была выбрана задача «Work for Robots». С текстом условия этой задачи можно ознакомиться на сайте Timus Online Judge [13], где она размещена под номером 1695 [14]. Формализованная версия условия задачи звучит следующим образом.

Дан неориентированный граф без петель и кратных ребер. Число вершин графа N находится в диапазоне от одной до 50. Необходимо найти число клик в этом графе (кликкой [11] называется полный подграф данного графа). Ограничение по времени – две секунды, ограничение по памяти – 64 МБ.

Данная задача является NP-полной [12]. Решение этой задачи основано на известном среди участников олимпиад по программированию приеме «meet-in-the-middle»: вершины графа делятся на два приблизительно равных по числу вершин множества, для каждого подмножества одного из этих множеств вычисляется число клик в нем, а для каждого подмножества второго множества выясняется, является ли оно кликой, после чего ответ на задачу возможно получить путем «слияния» результатов вычислений для двух половин.

По состоянию на 1 августа 2009 года по этой задаче было засчитано множество решений, основанных на неэффективных алгоритмах. К таким алгоритмам относится, например, перебор с запоминанием – число состояний, которые требуется запомнить, в худшем случае чрезвычайно велико, но на всех имевшихся тестах это число было небольшим. Были также сданы некоторые решения, эффективные по времени, но потенциально использующие больше памяти, чем разрешено.

Для генерации тестов к этой задаче была использована (1+1)-эволюционная стратегия, описанная в работе [11].

Кодирование теста. Тесты для данной задачи предлагается кодировать в виде матрицы булевых значений размера N , являющейся матрицей смежности графа, данного в тесте. При этом матрица является симметричной, а на ее диагонали всегда стоят нули. С одной стороны, такой способ кодирования является достаточно простым, а с другой стороны, попытки закодировать тест другим способом оказались недостаточно эффективными. Для того чтобы получающиеся тесты были как можно более трудными, для генерации тестов взято максимально возможное число вершин в графе ($N = 50$).

Оператор мутации. Для описанного выше способа кодирования разработано два оператора мутации. Первый оператор инвертирует один элемент матрицы, не стоящий на диагонали, и симметричный ему. Второй оператор симметрично инвертирует случайно выбранные элементы матрицы в количестве, не превышающем одной десятой от числа всех элементов матрицы. Данные операторы применяются поочередно.

Целью первого из операторов является попытка перепробовать все возможные «единичные» изменения теста. Для этого элементы матрицы, подлежащие изменению, перебираются в некотором, заранее определенном порядке, например, $A_{2,1}$, $A_{3,1}$, $A_{3,2}$ и т.д. Второй оператор делает более глобальные изменения, которые в некоторых случаях могут быстрее привести к цели.

Схема эволюционной стратегии. В данной работе используется (1+1)-эволюционная стратегия, описанная в работе [11]. Сначала генерируется случайным образом начальный тест и вычисляется его функция приспособленности. Далее к текущему тесту применяется один из операторов мутации (мутации с нечетным порядковым номером проводятся первым оператором мутации, с четным – вторым оператором). Если функция приспособленности полученного теста больше, чем у текущего теста, то новый тест замещает текущий, иначе текущий тест остается неизменным. Если в течение некоторого времени приспособленность тестов не увеличивается, то алгоритм запускается с новым начальным тестом.

Выбор функции приспособленности. Решения, использующие перебор с запоминанием, реализованы, как правило, в виде рекурсивной процедуры, которая вычисляет ответ для подграфа исходного графа, построенного на некотором подмножестве его вершин. Если для данного подграфа ответ еще не вычислялся, то производится вычисление и полученный ответ сохраняется, иначе возвращается сохраненный результат. При каждом вызове такой процедуры выполняется $O(1)$ или $O(\log N)$ действий (где N – число вершин в графе) в зависимости от структуры данных, используемой для хранения подсчитанной информации.

Решения, следующие описанной стратегии, можно условно разделить на три типа.

1. Запоминание вычисленных значений в ассоциативном массиве. Такие решения используют объем памяти, прямо пропорциональный числу вычисленных значений. Это число может быть очень большим, кроме этого, операции добавления и поиска в таких структурах, как ассоциативный массив, имеют большой скрытый множитель в асимптотической оценке, поэтому такие решения неэффективны.
2. Запоминание вычисленных значений в массиве небольшого размера. Для решений такого типа массив должен иметь размер, равный степени двойки. Небольшим считается размер массива, не превосходящий 32 МБ, так как массивы размером 64 МБ и более не умещаются в разрешенном объеме памяти вместе с исполняемым кодом программы. В этом случае в массиве можно запомнить не более 2^{23} значений. Хотя существуют корректные решения такого типа, многие решения, следующие этой стратегии, не укладываются в ограничение по времени, поскольку вынуждены много раз вычислять одни и те же значения, которые они не способны запомнить.
3. Запоминание вычисленных значений в массиве большого размера (64 МБ и более). Используя тот факт, что на x86-совместимых архитектурах компьютера для статических массивов память выделяется страницами по 4 КБ, можно определить в программе массив размером 64 МБ и более. Если не все ячейки массива использовались в процессе работы программы, объем использованной памяти, равный суммарному объему задействованных страниц, может быть намного меньше, в частности, удовлетворять ограничениям задачи. Однако существуют тесты, которые приводят к более плотному заполнению массива и нарушению ограничений на потребляемую память.

Для генерации тестов против решений первого и второго типа значение функции приспособленности равняется числу вызовов главной рекурсивной процедуры. Для достаточно сложных тестов это число имеет порядок нескольких десятков или сотен миллионов, в то время как для простых тестов это число не превышает нескольких десятков.

Для генерации тестов против решений третьего типа используемый массив разбивается на участки по 1 КБ, и функция приспособленности равняется числу таких участков, использованных при работе программы.

Для решений, не подходящих под вышеуказанные описания, используется индивидуальный подход к разработке функции приспособленности.

Результаты экспериментального исследования

Всего на момент начала эксперимента было засчитано 86 решений различных авторов. Для генерации тестов были отобраны 10 решений, которые, по предположению автора работы, представляли собой достаточно репрезентативную выборку некорректных решений. Из них одно решение относилось к третьему типу, большинство остальных решений примерно поровну распределялись между первым и вторым типами.

Против одного из отобранных решений не удалось сгенерировать тест, и после более тщательного теоретического анализа реализованного в нем алгоритма это решение было признано корректным. Против остальных решений было сгенерировано в совокупности 10 тестов, получивших номера с 43 по 52. В таблице для каждого теста T приведено число решений, которые прошли все тесты с номерами, меньшими T , и не прошли тест T , включая отдельную статистику для каждого возможного результата прохождения теста.

Таким образом, с помощью описанного метода сгенерированы тесты, позволившие почти полностью устранить имеющиеся на время проведения эксперимента зачетные неверные решения, которых было более 50% (45 из 86).

| № теста | Число решений, не прошедших тест ¹ | | | |
|---------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Все | WA ² | TL ³ | ML ⁴ |
| 43 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 44 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| 45 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| 46 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 47 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | 9 | 0 | 8 | 1 |
| 49 | 13 | 0 | 13 | 0 |
| 50 | 12 | 0 | 12 | 0 |
| 51 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 52 | 3 | 0 | 0 | 3 |
| Всего | 45 | 2 | 39 | 4 |

¹ Если решение не прошло тест с номером N , то оно не учитывается в статистике для тестов с большими номерами.

² Вердикт WA означает, что решение выдало неверный ответ.

³ Вердикт TL означает, что решение не уложилось в ограничение по времени.

⁴ Вердикт ML означает, что решение не уложилось в ограничение по памяти.

Таблица. Эффективность сгенерированных тестов

На текущий момент процент зачетных неверных решений составляет не более 25%, что существенно ниже, чем до использования описанного метода. Тем не менее, полностью устранить неверные решения по этой задаче не получилось. Связано это с тем, что новые некорректные решения существенно используют рандомизацию (перестановку номеров вершин), которой в данной задаче пока не удается противопоставить эффективные меры.

Заключение

В работе описан метод, позволяющий автоматически генерировать тесты для олимпиадных задач по программированию с использованием эволюционной стратегии. Данный метод был применен для генерации тестов для реальной олимпиадной задачи, где показал высокое качество тестов, создаваемых с его помощью. Полученные результаты позволяют утверждать, что описанный метод является достаточно перспективным в плане его применения при подготовке тестов для задач по олимпиадному программированию в целях повышения качества олимпиад.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. ACM International Collegiate Programming Contest [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/ACM_ICPC, свободный. Яз. англ. (дата обращения 26.09.2011).
2. TopCoder [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.topcoder.com/tc>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 26.09.2011).
3. International Olympiad in Informatics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ioinformatics.org>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 26.09.2011).
4. Google Code Jam [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://code.google.com/codejam>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 26.09.2011).
5. Russian Code Cup [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://russiancodecup.ru>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 26.09.2011).
6. Интернет-олимпиады по информатике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neerc.ifmo.ru/school/io/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 26.09.2010).

7. Правила проведения полуфинала NEERC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neerc.ifmo.ru/information/contest-rules.html>, свободный. Яз. рус., англ. (дата обращения 26.09.2010).
8. Оршанский С.А. О решении олимпиадных задач по программированию формата ACM ICPC // Информатика. – 2006. – № 1. – С. 21–26.
9. Акишев И.Р. Об опыте участия в командных соревнованиях по программированию формата ACM // Информатика. – 2008. – № 19. – С. 20–28.
10. Буздалов М.В. Генерация тестов для олимпиадных задач по программированию с использованием генетических алгоритмов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2 (72). – С. 72–77.
11. Baeck T., Hoffmeister F., Schwefel H.-P. A Survey of Evolution Strategies // Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms. – Morgan Kauffman, 1991. – P. 2–9.
12. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. – М: Мир, 1982. – 416 с.
13. Timus Online Judge. Архив задач с проверяющей системой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://acm.timus.ru>, свободный. Яз. рус., англ. (дата обращения 26.09.2010).
14. Задача «Work for Robots» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://acm.timus.ru/problem.aspx?num=1695>, свободный. Яз. рус., англ. (дата обращения 26.09.2011).

Буздалов Максим Викторович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, mbuzdalov@gmail.com

УДК 004.021

**АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
ТОРГОВОЙ СИСТЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

А.В. Лукашев

Проведен анализ существующих подходов к созданию автоматизированных торговых систем и их возможностей. Предложен вариант архитектуры программного решения для создания системы торговли ценными бумагами, использующей технический анализ.

Ключевые слова: алгоритм, автоматизированная система, технический анализ, индикатор, ценная бумага, архитектура программного обеспечения.

Введение

Под автоматизацией процесса торговли ценными бумагами понимается создание механической торговой системы (МТС). Механическая торговая система – это программа (или устройство, как следует из термина «механическая»), которая осуществляет автоматическое выставление и снятие заявок по заранее заложенной в нее логике, в соответствии с торговой системой (торговой стратегией). Также возможно выполнение программой дополнительных функций на усмотрение автора системы – контроль выставленных заявок, мониторинг сделок, анализ торговли с предоставлением графиков и отчетов и т.д. Вместо слова «механическая» было бы уместнее говорить «автоматическая» торговая система, но, в силу сложившихся традиций участники рынка, используют именно этот термин. В настоящее время существует множество торговых терминалов, позволяющих реализовать торговых роботов (MetaTrader, MetaStock, и т.п.). В силу этого можно найти множество решений, продающихся за небольшие (2000–4000 рублей) деньги. Большинство таких роботов имеют довольно простую стратегию, основанную на выявленных, но довольно неустойчивых принципах. Например, довольно популярная торговая стратегия 20/200 pips [1] действительно приносит определенную прибыль, что доказано испытаниями ее на реальных данных. Но она основана лишь на довольно неустойчивой закономерности рынка одного из множества инструментов.

Рассмотрим еще одну торговую стратегию – «14-дневный RSI» [2], основанную на более реальных правилах. В данной системе используется технический индикатор RSI, причем его показания используются не в классической его интерпретации. В результате получаем работающую, но не безопасную систему, которая работает только на больших временных отрезках.

Можно дальше рассматривать общедоступные системы, но их логика сводится к применению одного индикатора или правила, выявленного для определенного инструмента, что дает работающую, но не очень стабильную систему, допускающую большое количество ошибочных срабатываний. С одной стороны это обусловлено тем, что большинство таких систем реализованы с использованием функционально ограниченных терминалов, а с другой (с точки зрения разработки высоко нагруженных систем реального времени) – технически неудачными решениями. Наряду с ними существуют серьезные игроки, такие как RenaissanceTechnologies, но их решения недоступны для рассмотрения, так как являются закрытой информацией. В настоящей работе рассмотрим разработку МТС, основными отличительными особенностями которой должны стать:

- работа на любом наборе и комбинации индикаторов технического анализа, которая подразумевает наличие единого механизма принятия решений на основе данных индикаторов;
- возможность ее повторного применения на любых площадках, требующая создания набора классов и интерфейсов, описывающих основные сущности рынка;
- возможность работы на любых временных интервалах, которая может быть реализована созданием внутреннего механизма агрегации котировок;
- возможность использования промежуточных котировок, означающая, что система должна производить промежуточный анализ при получении каждой котировки;
- возможность работы по нескольким инструментам одновременно; достигается фильтрацией и передачей котировок по каждому из инструментов отдельному экземпляру системы принятия решений и набору индикаторов;
- возможность работы с любым брокером.

Состав системы

Агрегированные котировки. Система будет работать с котировками, агрегированными по временному интервалу, такие производные данные называют «бары» (англ. bar) или свечи (англ. candlestick). Агрегирование данных позволяет хранить и обрабатывать значительно меньшие объемы данных без потери точности расчетов. Во всех современных торговых терминалах для отображения текущего состояния рынка используют именно такой вид данных, поскольку он позволяет воспринимать, куда большие объемы данных, нежели отображение всех котировок, которые могут появляться несколько раз в секунду. Также это позволяет ориентировать стратегию на определенные временные интервалы.

Индикаторы технического анализа. Так как разрабатываемая система должна реализовывать стратегию, построенную на индикаторах технического анализа, необходимо предусмотреть абстрактный класс для индикаторов, позволяющий единым образом передавать индикатору биржевые данные и реализовывать собственный алгоритм расчета. Индикаторы в системе будут давать два вида сигналов – на открытие и закрытие сделки, причем с учетом направления (не для всех индикаторов верно утверждение о том, что сигнал об открытии сделки на понижающийся рынок автоматически означает сигнал на закрытие сделки в сторону повышения). Помимо алгоритма расчета и генерации сигналов, индикатор должен хранить минимально необходимую ему часть исторических данных, поскольку большинство индикаторов для вычисления нового значения требуют данных за прошлый период. В случае возникновения изменения ситуации на рынке с точки зрения конкретного индикатора сигнал должен быть передан в систему принятия конечного решения.

Обратная связь от индикатора и принятие решений. Для принятия решений в системе должен существовать класс, получающий данные об изменении прогноза индикатора и на основании всех прогнозов принимающий решение об открытии или закрытии позиции.

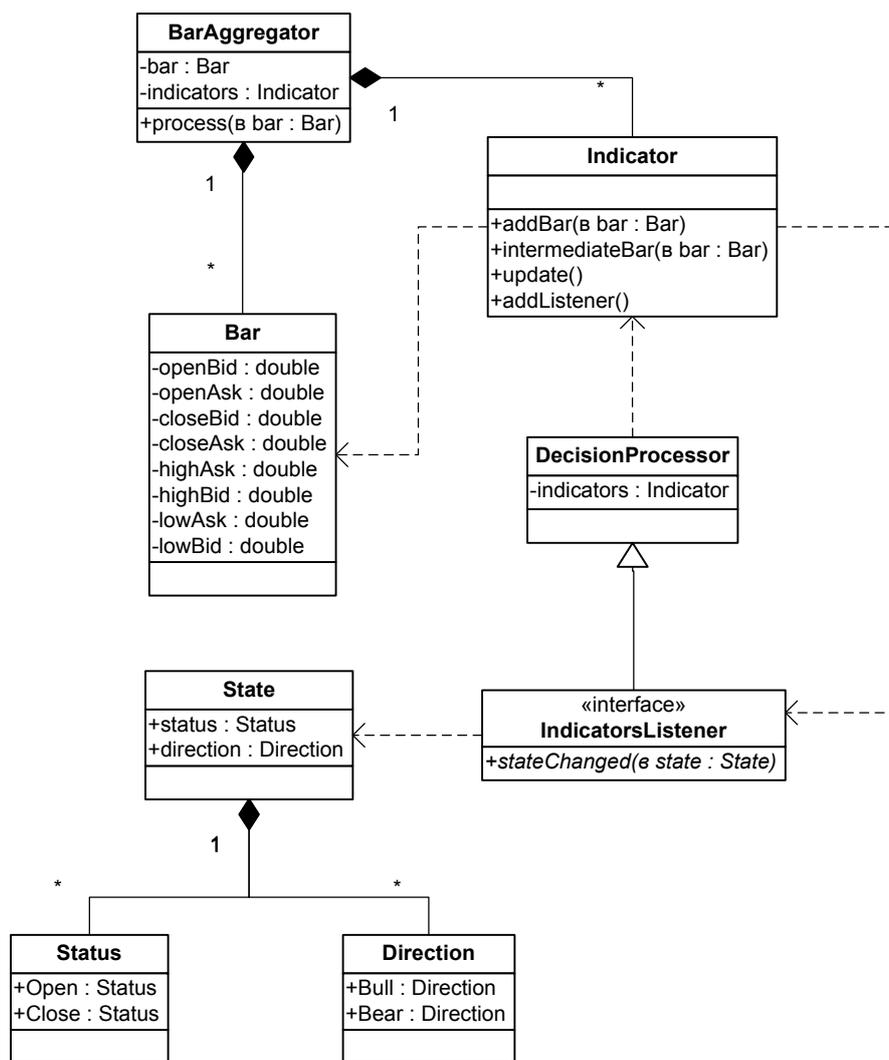


Рис. 1. UML диаграмма части системы, отвечающей за генерацию сигналов стратегии

Поскольку система может использовать множество индикаторов, производить действие нужно лишь в случае, когда все индикаторы системы дают одинаковый сигнал. В таком случае необходимо передать данные по сделке брокеру. Поскольку стратегия в данном случае является источником данных для индикатора, в соответствии с концепциями GOFPatterns [3] следует ввести интерфейс слушателя индикатора, который будет реализован стратегией. Данный шаблон (pattern) называется разрывом зависимости (DependencyInjection) и используется в случае необходимости взаимно связать две сущности, при этом не создавая циклическую взаимозависимость. Таким образом, получаем структуру, отраженную на рис. 1.

В структуре присутствуют следующие классы:

- State – отражает рекомендуемое действие в соответствии с прогнозом движения цены:
 - Status – открытие/закрытие;
 - Direction – направление, по которому делается прогноз;
- BarAggregator – рассчитывает агрегированную котировку за заданный интервал;
- Bar – агрегированные котировки;
- Indicator – индикатор;
- DecisionProcessor – принимает решение о конечном действии;
- IndicatorsListener – организует обратную связь от индикатора к DecisionProcessor.

Связь с брокером и отслеживание сделок. Поскольку в списке требований к системе была заявлена возможность работы с любым брокером, введем дополнительный уровень абстракции BrokerGateway, который будет предоставлять возможность выставить ордера и получать информацию об их обновлении. Реализация будет уже зависеть от конкретного брокера, в большинстве случаев это будет использование FIX-протокола, в некоторых случаях (например, брокер FXCM) это будет JavaAPI.

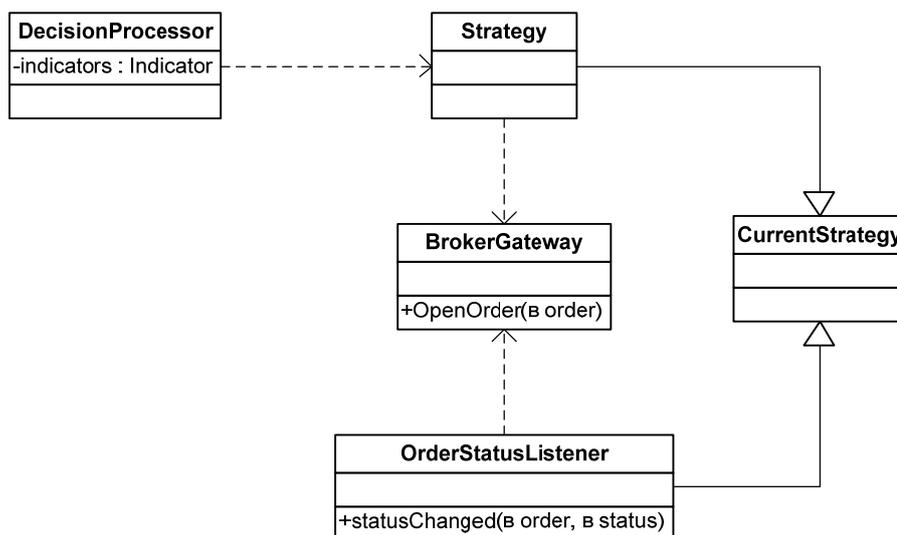


Рис. 2. Подсистема создания и обработки сделок

На рис. 2 представлен набор и связи сущностей, отвечающих за работу со сделками:

- Strategy – интерфейс стратегии;
- BrokerGateway – обеспечивает связь с брокером;
- OrderStatusListener – интерфейс, отслеживающий обработку изменений ордеров;
- CurrentStrategy – реализация стратегии.

При построении конечной системы следует создать отдельный экземпляр стратегии на каждый символ, связав его с единым экземпляром шлюза к брокеру, это позволит реализовать поддержку одновременной работы со многими символами. Общая диаграмма представлена на рис. 3.

Технологии

Для реализации системы автором был использован Springframework, который позволяет создать конфигурируемое приложение с минимальными усилиями, а также предоставляет шаблонные классы для использования других технологий (например, HibernateTemplate). Для работы с базой данных (используется для сохранения исторических данных) был применен Hibernate, поскольку позволяет избежать написания SQL-запросов.

В качестве дальнейшего развития системы планируется применение искусственных нейронных сетей в двух различных вариантах – для системы принятия решений и в качестве индикатора. На данный

момент разрабатывается алгоритм самообучения, который будет обучать систему в течение всего цикла жизни. Главным результатом ожидается получение интеллектуальной системы, способной подстраиваться под долгосрочные изменения рынка.

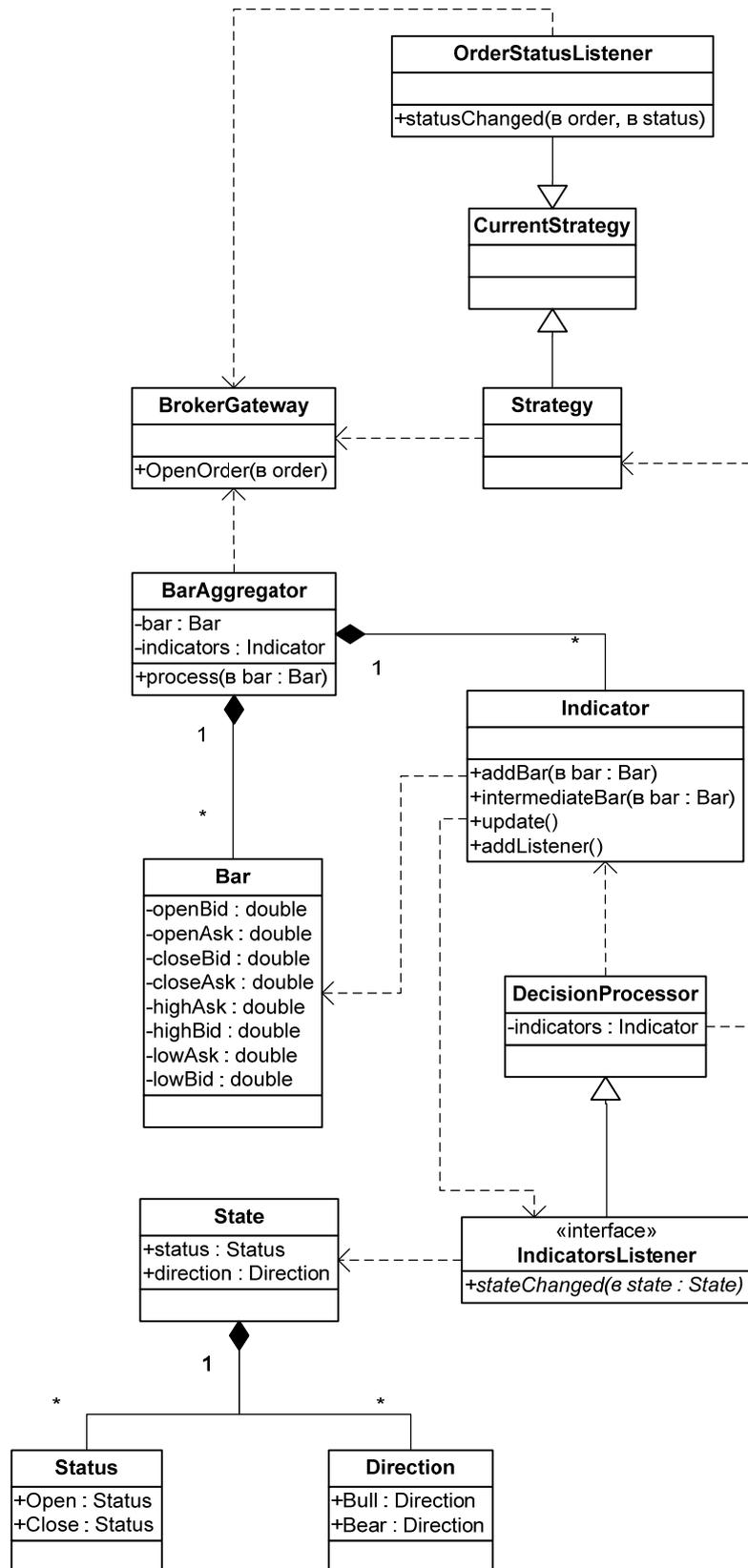


Рис. 3. Диаграмма системы

Заключение

В работе были рассмотрены доступные для экспертизы торговые системы. Исходя из предлагаемых реализаций, был сделан вывод, что они не позволяют вести безопасную внутридневную торговлю и работают на основании математически и фундаментально не подтвержденных правил. Использование комплекса инструментов технического анализа позволяет перекрыть основные требования и создать эффективную систему для работы на внутридневном рынке. В результате анализа проблемы были сформулированы требования, на основании которых разработан архитектурный подход к созданию автоматизированных систем, позволяющий полностью покрыть выставленные требования. Также следует отметить, что применение предложенного подхода не ограничено рынком Forex, при некоторых корректировках его можно перенести на фондовый рынок, а также рынок деривативных продуктов, которые, благодаря более высокой волатильности, позволят вести более прибыльную торговлю. В дальнейшем перспективным решением может быть применение нейронных сетей. С их применением можно создать самообучающийся индикатор достижения локального экстремума цены и силы тренда, а также модуль агрегации данных, поступающих от различных индикаторов. При условии создания эффективного алгоритма самообучения, такая система может иметь серьезные конкурентные преимущества, такие как универсальность и самоорганизация.

Литература

1. Смирнов П.В. Механическая торговая система «20/200 pips». Результаты торговли на 2010 год [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.autoforex.ru/lab/otchet-o-testirovanii-2010-god-20-200-v1/otchet-o-testirovanii-2010-god-20-200-v1.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.12.2010).
2. Медведев М. Механическая торговая система по RSI от Чака Лебо [Электронный ресурс]. – URL: <http://pisali.ru/medvedev70/3997/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 25.12.2010).
3. Steven John Metsker. Design Patterns Java(TM) Workbook. – Addison-Wesley Professional. – 2002. – 496 с.

Лукашев Александр Владимирович – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», аспирант, lukashev.alexander@gmail.com

УДК 629.7.07

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА ПАССАЖИРСКОГО СПРОСА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОДАЖ АВИАБИЛЕТОВ С УЧЕТОМ СВЕРХЛИМИТНОГО БРОНИРОВАНИЯ

К.А. Мозговая, М.В. Яблочкина, Г.М. Фридман

Представлены числовые результаты компьютерной симуляции процесса продажи авиабилетов с учетом сверхлимитной емкости и процесса предполетной регистрации пассажиров с компенсацией в случае отказа от предоставления места в самолете. Выполнен анализ влияния точности прогноза спроса на эффективность различных стратегий продаж. Установлено, что учет сверхлимитной емкости может привести к увеличению общей прибыли, связанной с продажей билетов, на 5–20% в зависимости от точности прогноза спроса.

Ключевые слова: прогноз пассажирского спроса, сверхлимитная (виртуальная) емкость воздушного судна, неявка на регистрацию, возврат билетов, компенсация.

Введение

Одной из самых старых и, возможно, самых эффективных с финансовой точки зрения стратегией управления доходами является практика сверхлимитных продаж (overbooking). Идея продавать большее, чем имеющееся в наличии, количество продукта, возникает в условиях предварительного резервирования с возможностью отказа от него до наступления момента реализации и (или) наличия неявок покупателей уже в момент реализации. Ярким примером служит индустрия авиаперевозок, где бронирование билетов на рейсы авиакомпаний начинается задолго до времени выполнения рейса. Отказы (cancellation), в зависимости от условий, установленных авиакомпанией, составляют до 50% всех броней, и нередки случаи, когда пассажиры по разным причинам не появляются к моменту вылета (no-show). Чтобы не упустить дополнительную прибыль и не возить незанятые места на рейсах, авиакомпании практикуют сверхлимитные продажи – продажи сверх емкости воздушного судна (ВС). Это приводит к возникновению рисков, связанных с необходимостью выплачивать значительные компенсации в случае, когда число зарегистрировавшихся на вылетающий рейс пассажиров оказывается больше емкости назначенного на этот рейс ВС и соответственно к падению прибыли от продажи авиабилетов. Следовательно, любая авиакомпания заинтересована в минимизации этих рисков за счет определения виртуальной емкости ВС – оптимального с точки зрения общей прибыли количества авиабилетов, которые следует продавать на рейс с назначенным ВС известной физической емкости.

Задача определения виртуальной емкости ВС рассматривалась во многих статьях и книгах, обзор которых можно найти в [1, 2]. Также отдельно упомянем работы [3, 4].

Прогнозы общего пассажирского спроса, неявок пассажиров к регистрации и возвратов авиабилетов служат основными исходными данными к решению задачи. В представленной работе приведены числовые результаты, дающие возможность оценивать влияние их точности на эффективность принятой стратегии сверхлимитных продаж. Все расчеты выполнены при помощи созданного авторами компьютерного симулятора деятельности авиакомпании.

Математические постановки оптимизационных задач определения виртуальной емкости рейса и пределов бронирования

Положим, что на некоторый рейс продаются авиабилеты (продукты) с ценами f_j , $j = 1, \dots, n$. Предполагается (прогнозируется), что спрос D_j на каждый продукт j представляет собой случайную величину, распределенную по нормальному закону распределения со значениями среднего μ_j и среднеквадратического отклонения σ_j , $j = 1, \dots, n$.

При известных средней цене P билета на рейс, физической емкости Cap назначенного на рейс ВС и прогнозе осредненной вероятности p появления пассажира, купившего билет, к предполетной регистрации (так называемый show rate) задача состоит в нахождении величины B – виртуальной емкости, при которой достигает максимума выражение $R(B)$:

$$R(B) = B \times T - C_R \times T \times B \times (1 - p) - F(B, p, Cap) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $F(B, p, Cap)$ – компенсационная функция, определяющая размер ожидаемых потерь, связанных с выплатой компенсаций «лишним» пассажирам на рейсе в случае продажи B билетов на ВС емкостью Cap ; при этом $F(B, p, Cap) = 0$ для $B \leq Cap$. Различные способы расчета компенсационной функции обсуждены в работах [2, 5]. Коэффициент $0 \leq C_R \leq 1$ показывает долю средней цены билета P , возвращаемую пассажиру в случае его неявки к регистрации. Среднюю цену билета на данном рейсе можно, например, вычислить по формуле:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^n f_j \times D_j}{\sum_{j=1}^n D_j}.$$

Первое слагаемое в (1), очевидно, представляет собой доход от продажи B билетов на рейс, а второе и третье – ожидаемые потери, связанные с этими продажами. Таким образом, величина $R(B)$ – это ожидаемая прибыль, которую следует максимизировать.

Оптимальное значение виртуальной емкости B используется затем для расчета пределов продаж на рейс. Эта задача формулируется следующим образом: требуется так распределить количество мест, которое отводится каждому продукту j , чтобы максимизировать ожидаемый общий доход от продаж. Обозначим через x_j количество билетов, выделяемых на рейсе продукту j (так называемый предел бронирования для этого продукта), тогда целые неотрицательные значения x_j могут быть найдены из решения оптимизационной задачи [6]:

$$\sum_{j=1}^n f_j \times \sum_{m=1}^{x_j} (1 - \Phi(\mu_j, \sigma_j, m)) \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j \leq B, \quad (3)$$

где $\Phi(\mu, \sigma, x)$ – функция распределения нормального закона с параметрами μ и σ в точке x . Задача (2)–(3) является задачей нелинейного программирования, однако может быть сведена к задаче целочисленного либо, в упрощенном случае, линейного программирования за счет введения индикаторных переменных.

Сформулированные задачи в качестве исходных данных требуют задания:

- физической емкости Cap назначенного на рейс ВС;
- цен m и прогноза спроса D_j для каждого продукта (класса авиабилета) $j = 1, \dots, n$;
- вероятности p появления пассажира на предполетной регистрации;

- различных вероятностных и ценовых параметров, используемых при вычислении компенсационной функции $F(B, p, Cap)$, например, вероятности добровольного отказа пассажира от места в ВС, размера затрат на обслуживание пассажира во время ожидания следующего рейса и т.п.

Совместное решение задач (1) и (2)–(3) дает возможность учесть виртуальную емкость назначенного на рейс ВС при выработке оптимальной стратегии продаж авиабилетов на этот рейс и тем самым более полно удовлетворить имеющийся спрос.

Компьютерная симуляция процесса продаж и предполетной регистрации

Полученные в результате значения как для виртуальной емкости B , так и для пределов бронирования x_j , $j = 1, \dots, n$, оказываются оптимальными только в том случае, когда прогноз спроса, неявок и отказов будет точным, что, конечно, на практике встречается чрезвычайно редко. В связи с этим большой интерес представляет собой анализ влияния ошибок этих прогнозов на эффективность стратегии продаж. Предложенная авторами процедура компьютерной симуляции процесса продаж и предполетной регистрации дала возможность получить числовые данные для проведения такого анализа.

Симуляция включает в себя следующие шаги:

- генерирование потока запросов – создание упорядоченного по времени множества событий, каждое из которых представляет собой запрос на покупку либо возврат билета на один из продуктов рейса, т.е. формирование списка покупателей;
- процесс продаж авиабилетов – последовательная обработка потока запросов, в результате чего формируется множество удовлетворенных запросов, т.е. список пассажиров, купивших билеты на рейс;
- процедура предполетной регистрации – последовательная обработка потока удовлетворенных запросов с целью выявления «лишних» пассажиров на рейсе (сверх физической емкости назначенного на рейс ВС) и предоставления им предусмотренной компенсации за отказ в предоставлении уже оплаченной услуги.

Каждое событие в потоке запросов – это список из четырех элементов вида $\{ID, t, j, q\}$, где ID – уникальный идентификатор запроса; t – время появления запроса (указывается в минутах до вылета рейса); $j = 1, \dots, n$ – номер продукта, на который поступил данный запрос; наконец, $q = 1$, если событие представляет собой запрос на покупку, и $q = -1$, если это возврат ранее купленного билета.

Для формирования потока запросов были заданы коэффициенты k_j^1 и k_j^2 ошибок прогноза по среднему μ_j и среднеквадратическому отклонению σ_j , и параметры нормально распределенного «реального» спроса для каждого продукта вычислены, как $k_j^1 \times \mu_j$ и $k_j^2 \times \sigma_j$ соответственно. Затем для этих параметров были сгенерированы нормально распределенные псевдослучайные числа, показывающие общее количество запросов на покупку для каждого продукта. Аналогичные действия были выполнены и при формировании списка отказов. Каждому событию (покупка/отказ) было сопоставлено равномерно распределенное натуральное число t , указывающее время осуществления этого события. После проведения процесса сортировки множества событий по убыванию величины t был сформирован список запросов.

Отметим, что в практике авиакомпаний принято разбивать весь горизонт продаж контрольными точками (так называемыми временными срезами) на временные интервалы. Количество таких срезов T заранее оговорено. Срезы нужны, прежде всего, для корректировки выбранной стратегии продаж, т.е. пересчета пределов бронирования исходя из остаточной виртуальной вместимости и остаточных прогнозов спроса и отказов. Весь сформированный поток запросов при симуляции продаж сгруппирован по этим временным интервалам.

Симуляция процесса продаж заключается в последовательной обработке каждого запроса. Запрос на покупку билета продукта j принимается, если текущий предел бронирования для этого продукта и остаточная виртуальная емкость ВС положительны. Такой запрос добавляется к списку принятых запросов, а текущий предел бронирования продукта вместе с остаточной виртуальной емкостью уменьшаются на единицу, после чего обрабатывается следующий запрос. Процесс продаж на рейс продолжается до следующего временного среза и прекращается либо с обнулением остаточной виртуальной емкости, либо естественным образом – с окончанием запросов. Если поступает запрос на возврат билета, то осуществляется проверка, был ли этот билет ранее куплен, и при положительном ответе запрос удовлетворяется, текущий предел бронирования соответствующего продукта увеличивается на единицу вместе с остаточной емкостью. В противном случае запрос игнорируется.

В начальном временном срезе под номером $\tau = 1$ производится расчет виртуальной емкости $B = B_1$, оптимальных пределов бронирования x_j , $j = 1, \dots, n$ после чего выполняется компьютерная симуляция продаж для сгенерированного потока запросов вплоть до наступления следующего временного

среза. В нем происходит пересчет остаточной виртуальной емкости B_τ и, соответственно, пределов бронирования по формулам (2)–(3), после чего продолжается симуляция процесса продаж. Этот цикл повторяется для каждого временного среза $\tau = 2, 3, \dots, T$.

Предусмотрены три варианта пересчета величины B_τ в срезе τ :

- простейший вариант, учитывающий только возможные возвраты купленных авиабилетов:

$$B_\tau = Cap - p_{SR}^\tau \times K_\tau, \quad (4)$$

где K_τ – количество проданных авиабилетов к срезу τ ; p_{SR}^τ – вероятность того, что билет, купленный в интервале между срезами τ и $\tau + 1$, не будет возвращен до момента вылета рейса. Эта вероятность вычисляется через прогнозы p_{CR}^τ вероятности отказов от купленных билетов во временном интервале между срезами τ и $\tau + 1$:

$$p_{SR}^\tau = \prod_{k=\tau}^T (1 - p_{CR}^k).$$

- учет возвратов и разовый расчет виртуальной емкости:

$$B_\tau = B - p_{SR}^\tau \times K_\tau. \quad (5)$$

Единственное (но существенное) отличие от предыдущего варианта состоит в замене физической емкости Cap изначально определенной виртуальной емкостью $B = B_1$.

- третий вариант пересчета состоит из нескольких шагов: сначала вычисляется остаточная физическая вместимость с учетом возможных возвратов,

$$Cap_\tau = Cap - p_{SR}^\tau \times K_\tau, \quad (6)$$

а затем определяются сетевые цены продуктов (коэффициенты Лагранжа) [1, 2, 7] при $B = Cap_\tau$ в задаче (2)–(3). Полученные сетевые цены используются для пересчета средней цены P билета на рейс, после чего решается задача (1), и в результате находится остаточная виртуальная емкость B_τ на срезе τ .

По окончании симуляции процесса продаж формируется список удовлетворенных запросов на покупку/возврат билетов. На его основе создается поток пассажиров, пришедших на регистрацию. Предварительно из списка удовлетворенных запросов удаляются пары элементов, соответствующих купленным и затем возвращенным билетам. Далее, для каждого удовлетворенного запроса на покупку с номером ID выполняется генерирование псевдослучайных чисел 0 и 1 с вероятностями $(1 - k^3 \times p)$ и $k^3 \times p$, где p – прогноз осредненной вероятности появления пассажира на регистрацию, а k^3 – заданная ошибка этого прогноза. При «выпадении» единицы (пассажир приходит на регистрацию) создается тройка вида $\{ID, t_c, j\}$, где $j = 1, \dots, n$ – номер продукта, а равномерно распределенное псевдослучайное число $0 \leq t_c \leq 180$ – время появления пассажира к регистрации (указывается в минутах до окончания регистрации). Отсортированное по убыванию величины t_c множество таких троек представляет собой поток пассажиров на регистрации. Поскольку продажа производилась по виртуальной емкости, то число пришедших на регистрацию пассажиров может оказаться больше физической емкости ВС. В этом случае по заранее определенному алгоритму проводится выплата компенсаций и полученная в результате продаж авиабилетов прибыль уменьшается. Величина прибыли от продаж авиабилетов за вычетом произведенных компенсационных выплат служит главной характеристикой эффективности стратегии управления доходами для рейса.

Числовые результаты компьютерной симуляции процесса продаж и регистрации

Ниже представлены результаты компьютерной симуляции процесса продаж и регистрации для простого модельного примера полетного расписания, состоящего из двух рейсов: из пункта А в В (А–В) и из пункта В в С (В–С) с физическими емкостями назначенных на них ВС 50 и 70 мест. Рейсы образуют 3 маршрута: А–В, В–С, А–В–С. На каждом маршруте есть билеты по полной стоимости и со скидкой, т.е. авиакомпания предлагает 6 продуктов. Цены и прогнозы параметров (μ_j, σ_j) спроса на продукты по временным интервалам указаны в таблице.

На рис. 1 и рис. 2 изображены результаты расчетов зависимости эффективности C сверхлимитных продаж от ошибок прогноза по среднему и среднеквадратическому отклонению для трех различных способов пересчета виртуальной емкости. Под эффективностью понимается отношение прибылей, полученных в результате компьютерной симуляции процессов продаж и регистрации с учетом и без учета виртуальной емкости. Три линии соответствуют трем вариантам пересчета виртуальной емкости B_τ . Уравнения кривых являются наилучшими среднеквадратическими приближениями для полученных расчетных точек. Каждая точка – результат осреднения 100 расчетов для сгенерированных потоков запросов.

| Маршруты | Цена, ед. | Прогноз параметров спроса $(\mu_j, \sigma_j), j = 1, \dots, 6$ | | | | |
|----------|-----------|--|------------|------------|------------|-------------|
| | | $\tau = 1$ | $\tau = 2$ | $\tau = 3$ | $\tau = 4$ | Σ |
| А-В | 40 | (1, 0,1) | (3, 0,3) | (5, 0,5) | (6, 0,6) | (15, 0,843) |
| | 24 | (10, 1) | (8, 0,8) | (4, 0,4) | (3, 0,3) | (25, 1,38) |
| В-С | 70 | (4, 0,4) | (6, 0,6) | (9, 0,9) | (11, 1,1) | (30, 1,59) |
| | 42 | (18, 1,8) | (12, 1,2) | (6, 0,6) | (4, 0,4) | (40, 2,28) |
| А-В-С | 100 | (0, 0) | (1, 0,1) | (4, 0,4) | (5, 0,5) | (10, 0,66) |
| | 60 | (8, 0,8) | (6, 0,6) | (4, 0,4) | (4, 0,4) | (22, 1,15) |

Таблица. Данные по ценам и прогнозу параметров спроса на продукты

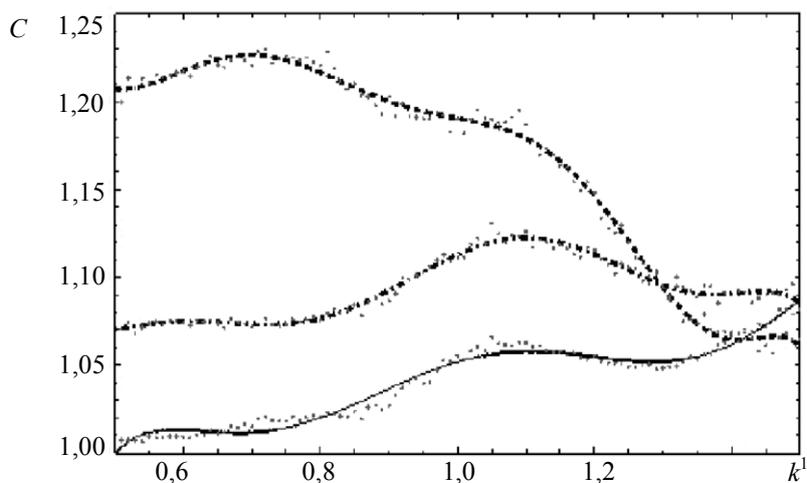


Рис. 1. Эффективность сверхлимитных продаж в зависимости от коэффициента k_j^1 ошибки прогноза спроса по μ_j при $k_j^2 = 1$ для различных способов пересчета B_τ : сплошная линия – пересчет по (4), пунктирная – по (5), штрих-пунктир – по (6)

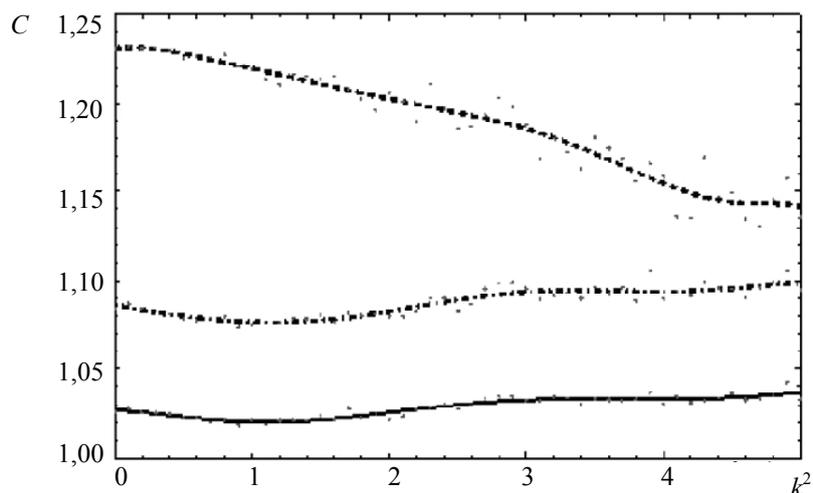


Рис. 2. Эффективность сверхлимитных продаж в зависимости от коэффициента k_j^2 ошибки прогноза спроса по σ_j при $k_j^1 = 0,8$ (спрос переоценен) для различных способов пересчета B_τ : сплошная линия – пересчет по (4), пунктирная – по (5), штрих-пунктир – по формуле (6)

Заключение

Расчеты, выполненные для модельного примера, показывают, что эффективность использования сверхлимитных продаж может достигать 20%. Размер ожидаемой дополнительной прибыли существенно зависит как от способа пересчета виртуальной емкости, так и от точности прогноза спроса. Наиболее выгодным является третий способ пересчета виртуальной емкости, который по своим результатам превосходит остальные практически во всем диапазоне значений коэффициентов ошибок прогноза. Однако в случае сильно недооцененного спроса (при $k_j^1 \geq 1,2$) эффективность использования сверхлимитных продаж значительно падает, а разница в способах пересчета B_τ оказывается незначительной. Тем не менее, даже в этом случае ожидаемая общая прибыль от продаж увеличивается на 5–7%.

Литература

1. Barnhart C., Belobaba P., Odoni A. Transportation Science // Applications of Operations Research in the Air Transport Industry. – 2003. –V. 37. – № 4. – P. 368–391.
2. Talluri K., van Ryzin G. The Theory and Practice of Revenue Management. – Springer, 2005. – P. 129–160.
3. Яблочкина М.В. Определение оптимального уровня сверхлимитного бронирования авиабилетов для нескольких рейсов // В мире научных открытий № 1. Математика. Механика. Информатика. – 2011. – С. 32–34.
4. Siddappa S. Statistical modeling approach to airline revenue management with overbooking // Ph.D. thesis. – USA: The University of Texas at Arlington, 2006. – P. 25–44.
5. Яблочкина М.В. Определение оптимального уровня сверхлимитного бронирования авиабилетов с использованием компенсационной функции // Научное творчество XXI века: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Приложение к журналу «В мире научных открытий». – Красноярск, 2011. – Вып. 2. – С. 173–174.
6. Виноградов Л.В., Фридман Г.М., Шебалов С.М. Математическое моделирование в оптимизации планирования авиационных перевозок: формулировки и методы решения типовых задач // Научный Вестник МГТУГА. – 2008. – С. 49–57.
7. Лавренюк О.В. Определение оптимальных пределов продаж авиабилетов с учетом сетевых цен на продукты // II Всероссийская научная конференция «Научное творчество XXI века». В мире научных открытий. – 2010. – № 2 (08). – Ч. 3. – С. 30–33.

- Мозговая Кристина Александровна** – Санкт-Петербургский государственный университет экономики и финансов, аспирант, kristina.mozg@gmail.com
- Яблочкина Мария Вадимовна** – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, студент, soug-apple@mail.ru
- Фридман Григорий Морицевич** – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, доктор технических наук, профессор, gregory_fridman@list.ru

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 002.53/55

АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СПИСКОВ ЛИТЕРАТУРЫ ДИССЕРТАЦИЙ
СРЕДСТВАМИ BIBTEX

В.Г. Мельников, П.В. Касикова, М.А. Белинка

Решается задача автоматизации формирования списков литературы диссертаций в соответствии с требованиями последних государственных стандартов. Рассматриваются особенности разработки и применения созданного стилевого файла.

Ключевые слова: BibTeX, TeX, автоматизация, системы компьютерной верстки.

Одной из важных задач при написании диссертаций, книг, а также других научных публикаций является правильное формирование и оформление списка использованной литературы, в частности, оформление в соответствии с действующими ГОСТами [1, 2]. Большое разнообразие существующих ГОСТов, их параллельное хождение и взаимопересекающиеся области применения, наряду с нечетко обозначенными и в ряде случаев многозначными либо отсутствующими правилами оформления, делают задачу корректного оформления нетривиальной, в особенности для неспециалистов в данной области. В связи с этим актуальной и требующей скорейшего решения является задача автоматизации формирования списка литературы. Для ее решения может быть использовано специализированное программное обеспечение для создания форматированных списков библиографии BibTeX, входящее в дистрибутивы систем компьютерной верстки TeX и LaTeX [3] и, при наличии корректно написанного под действующие стандарты стилевого файла, дающие нужный результат. Большинство существующих стилевых файлов англоязычны, они ориентированы на требования зарубежных изданий и издательств. Аналогом разработанному стилевому файлу является пакет файлов gost (<http://www.ctan.org/tex-archive/biblio/bibtex/contrib/gost/>), разработанный М. Поляковым и отчасти решающий поставленную задачу в рамках предшествующих ГОСТов. В то же время отсутствие или некорректное оформление в этих стилевых файлах таких важных стилей, как патент, заявка на патент, автореферат, диссертация, электронная публикация, некоторых полей, характерных для русскоязычной периодики, а также невозможность вмешательства в сортировку списка и внесения нестандартных записей с форматированием в ручном режиме существенно сужают область их применения.

В результате решения проблемы был разработан новый стилевой файл vak.bst, который обеспечивает форматирование основных типов записей в соответствии с последними ГОСТами: [1] охватывает основные типы и виды публикаций, в том числе электронные, [2] – электронные публикации. Далее отмечены некоторые особенности применения разработанного стилевого файла. Для обеспечения пользователю возможности влияния на автоматическую сортировку записей внутри списка литературы, которая актуальна, например, в случае нескольких публикаций одного автора с разными соавторами, была использована стандартная переменная key, которой был присвоен высший приоритет при сортировке. В результате стала возможна также полностью ручная сортировка списка, что дает пользователю полный контроль над этим процессом. Следует отметить, что глобальная задача формализации и охвата в стилевом файле всех возможных случаев и нюансов записей является весьма сложной, и разработанный стилевой файл решает ее лишь отчасти, для случаев наиболее распространенных их видов (существенно расширяя их число по сравнению с аналогами). Для остальных случаев в разработанном файле была введена дополнительная возможность полностью ручного форматирования. Для этой цели был переименован и сформулирован тип записи misk, где отображаемые данные вносятся в поле comment и форматироваются вручную на языке LaTeX. Правильная сортировка таких записей внутри общего списка обеспечена при заполненных полях author (или key) и year. В новом стилевом файле также появилась возможность описания электронных публикаций. При этом используется переменная url. На рисунке приведены некоторые примеры работы файла с такими стилями, как патент, заявка на патент, электронные публикации соответственно, с автоматической сортировкой их с приоритетом по неотображаемой переменной key. Первая запись иллюстрирует работу стиля @PATENT, где использованы переменные author, number, year, note, title, organization и введены новые переменные znumber – номер заявки, country – страна действия патента, language – язык публикации, numpages – количество страниц. Вторая запись показывает результат применения нового стиля @ZPATENT (заявка на патент), третья является результатом работы стиля @BOOK для описания электронной публикации, где для указания Интернет-ссылки использована переменная url.

Представленный стилевой файл позволяет широкому кругу пользователей корректно формировать список литературы диссертаций и других публикаций в соответствии с последними государственными стандартами. Разработанный стилевой файл vak.bst вместе с подробной сопроводительной информацией

и образцами применения файла размещен на серверах CTAN (Comprehensive Tex Archive Network), в частности, на центральном Кэмбриджском сервере <http://www.tex.ac.uk/tex-archive/biblio/bibtex/contrib/vak/>.

1. Пат.2348020 РФ, МПК⁷G 01 М 1/10 Способ определения тензора инерции и координат центра масс тела и устройство для его осуществления / Мельников, В. Г. ; заявитель и патентообладатель СПбГУ ИТМО. — № 2007129443 ; заявл. 31.07.07 ; опубл. 27.02.09 Бюл. № 6. — 14 с.
2. Заявка 023389 РФ, МПК⁷G 01 М 1/10 Способ определения тензора инерции тела и устройство для его осуществления / Мельников, В. Г. ; заявитель СПбГУ ИТМО. — № 2009117025 ; заявл. 04.05.09. — 20 с.
3. *Мельников, Г. И.* Курс теоретической механики [Электронный ресурс] : электрон. учеб. по дисциплине "Теоретическая механика" / Г. И. Мельников, А. Г. Кривошеев ; СПбГУИТМО, Каф. теоретической физики и механики. — СПб. : СПбГУИТМО, 2006. — Режим доступа: http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=29. свободный.

Рисунок. Пример работы стилей @PATENT, @ZPATENT и @BOOK стилового файла vak.bst

Авторы благодарят заведующего научно-библиографическим отделом ИТМО А.В. Кириленко за ценные замечания и консультации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 10-08-01046).

1. ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. — Взамен ГОСТ 7.1-84. — Введ. 01.07.2004. — М: Изд-во стандартов, 2004. — 166 с.
2. ГОСТ 7.82-2001. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов. — Введ. 01.07.2002. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, 2002. — 27 с.
3. Котельников И.А., Чеботаев П.З. L^AT_EX по-русски. — Новосибирск: Сибирский хронограф, 2004. — 496 с.

Мельников Виталий Геннадьевич — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, melnikov@mail.ifmo.ru

Касикова Полина Владимировна — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, mo-only@yandex.ru

Белинка Максим Алексеевич — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, prosvetv@yandex.ru

УДК 681.3

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕЧАТНОГО УЗЛА

О.В. Кузнецова, Е.Б. Романова

Проведен анализ методов формирования трехмерной модели печатного узла в различных САПР. Приводятся основные достоинства и недостатки методов. Сделан вывод о применении методов формирования 3D-модели печатного узла.

Ключевые слова: печатная плата, трехмерная модель, САПР.

В ходе анализа методов формирования 3D-модели печатного узла (под печатным узлом понимается печатная плата с установленными на ней электронными компонентами) были рассмотрены следующие САПР: САТУРН (приложение, функционирующее в среде КОМПАС 3D), Altium Designer, T-FLEX CAD и CADSTAR 3D.

Машиностроительные САПР (MCAD), в том числе САТУРН и T-FLEX CAD, обеспечивают проектирование 3D-моделей сборочных узлов достаточно высокой сложности. Передача данных о 3D-моделях печатных узлов возможна несколькими путями: через форматы IGES, STEP, IDF, PDF, DXF и др. Использование MCAD позволяет ускорить процесс проектирования 3D-модели печатного узла за счет возможности переработки данных о печатном узле посредством различных форматов. Повышается качество визуализации 3D-модели печатного узла. Предоставляется возможность конвертации в различные форматы обмена данных для САЕ-систем с целью проведения прочностного, теплового и других видов анализа, расчетов вибрации. Комплект конструкторской документации соответствует всем требованиям ЕСКД [1].

Существуют два метода формирования 3D-модели печатного узла в радиоэлектронных САПР (ЕСАД): метод замены двумерных электронных компонентов на трехмерные компоненты и метод экструзии. Поддержка работы с 3D-моделями позволяет не только проверять сопряженность радиокомпонентов друг с другом, но и добавлять элементы, которых нет на электрической принципиальной схеме (рисунок).

В трехмерных ЕСАД имеется возможность создания библиотеки трехмерных моделей. Модель компонента, ранее созданную в любой из САПР твердотельного моделирования и сохраненную в формате STEP, можно добавить к посадочному месту. Также наряду с использованием 3D-моделей компонен-

тов (в формате STEP) используется метод экструзии, который заключается в формировании габаритных моделей в виде параллелепипедов по заданной высоте компонента.

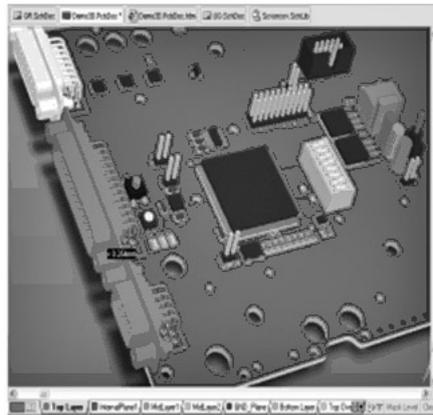


Рисунок. Трехмерная модель печатного узла

Единая среда разработки в трехмерных ECAD позволяет открывать все документы, которые обычно связаны единым проектом, в одном приложении, за счет чего имеется постоянная связанность между ними. При работе в трехмерных ECAD нет конвертации, т.е. нет потери и искажения данных, в отличие от процесса формирования 3D-модели печатного узла в MCAD. Процесс формирования комплекта конструкторской документации недостаточно функционален [2].

Метод формирования 3D-модели печатного узла в MCAD применяется при 2D-моделировании плат в таких САПР, как P-CAD, OrCAD, Mentor Graphics, и при формировании 3D-модели печатного узла в MCAD, таких как Solid Works, Pro/Engineer, T-FLEX CAD, САТУРН. Методы формирования 3D-модели печатного узла, такие как метод замены двумерных электронных компонентов на трехмерные компоненты и метод экструзии, применяются при моделировании плат в таких САПР, как Cadstar-3D и KiCad, Altium Designer.

1. Bagayev D.V., Firuman A.K. Complex process engineering of projection of electronic devices by means of automatized system SATURN // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW 06), 15–19 September, 2006, Sochi (Russia). – Kharkov: Kharkov National University of Radioelectronics, 2006. – P. 247–251.
2. Сабунин А. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств // Системы проектирования. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – С. 198–201.

Кузнецова Ольга Валерьевна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, olunchik_1989@mail.ru

Романова Ева Борисовна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, eva_rom@mail.ru

УДК 681.3

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ОБЪЕДИНЕНИЕМ МЕЖСЕТЕВЫХ ЭКРАНОВ В ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ КЛАСТЕРЫ

В.А. Богатырев, М.В. Попова, С.В. Богатырев, В.Ю. Кудрявцева, С.Б. Фокин

Рассмотрена оптимизация многоуровневой вычислительной системы при объединении межсетевых экранов в отказоустойчивые кластеры.

Ключевые слова: отказоустойчивость, кластер, межсетевой экран, оптимизация, сервер.

Центры хранения и обработки данных при их высокой производительности и отказоустойчивости должны обладать низкой стоимостью, что обуславливает необходимость их оптимизации.

В качестве объекта оптимизации выберем многоуровневые вычислительные системы, содержащие n кластерных групп серверов с разделением прав доступа, при объединении межсетевых экранов в отказоустойчивые кластеры, что позволяет существенно повысить надежность и производительность контура обеспечения безопасности и вычислительной системы в целом [1–3].

Для вычислительных систем с выделением n групп серверов, каждая из которых из соображений информационной безопасности доступна для определенного типа запросов (например, исходя из адреса источника запросов), рассмотрим два варианта объединения резервированных межсетевых экранов в кластеры:

А. межсетевые экраны объединяются в единый кластер для всех групп серверов;

В. межсетевые экраны объединяются в кластер для каждой группы серверов отдельно.

При оптимизации для вариантов **A** и **B** требуется найти кратность резервирования узлов, при котором достигается минимум среднего времени пребывания запросов при ограничении стоимости реализации системы C_0 . Для вариантов **A** и **B** средние времена пребывания запросов в системе и затраты на их реализацию равны

$$T_A = \frac{v_0}{1-\lambda_0 v_0/n_0} + \frac{v_1}{1-\lambda_0 v_1/n_1} + \sum_{i=0}^n b_i \left[\frac{v_2}{1-b_i \lambda_0 v_2/M_i} + \frac{V_i}{1-b_i \lambda_0 V_i/m_i} \right],$$

$$T_B = \frac{v_0}{1-\lambda_0 v_0/n_0} + \sum_{i=0}^n b_i \left[\frac{v_1}{1-b_i \lambda_0 v_1/r_i} + \frac{v_2}{1-b_i \lambda_0 v_2/M_i} + \frac{V_i}{1-b_i \lambda_0 v_i/m_i} \right],$$

$$C_A = n_0 c_0 + n_1 c_1 + \sum_{i=0}^n (c_2 M_i + c_3 m_i + c_a \left[n_0(1+n_1) + \sum_{i=0}^n M_i(n_1+m_i) \right]),$$

$$C_B = n_0 c_0 + \sum_{i=0}^n (r_i c_1 + c_2 M + c_3 m_i + c_a \left[n_0 + \sum_{i=0}^n (n_0 r_i + M_i(r_i+m_i)) \right]),$$

где v_0, v_1, v_2 – среднее время обслуживания в коммутаторах уровня доступа, межсетевых экранах и внутренних коммутаторах серверных групп; V_i – среднее время выполнения запросов в серверах i -ой группы; λ_0 – интенсивность потока запросов; b_i – вероятность запроса к серверам i -ой группы, число коммутаторов в которой равно M_i , а число серверов m_i ; n_0 – число коммутаторов уровня доступа; n_1 – число межсетевых экранов в объединенном кластере для варианта **A**, а r_i – их число в каждой кластерной группе экранов для варианта **B**. Стоимости сетевых адаптеров равны c_a , коммутаторов уровня доступа – c_0 , межсетевых экранов – c_1 , коммутаторов внутри серверных групп – c_2 , а стоимость сервера равна c_3 .

Приведем результаты оптимизации при $n=4$; $b=(0,1; 0,1; 0,1; 0,7)$, $v_0=0,1$; $v_1=0,9$; $v_2=0,1$ с; $V_0=V_1=V_2=3$ с; $c_0=1$, $c_1=3$, $c_2=1$, $c_3=6$, $c_a=0,01$ у.е. и ограничении средств на построение системы $C_0=300$ у.е. Оптимизация проведена в системе компьютерной математики MathCAD-15, при этом установлено, что для варианта структуры **A** при $\lambda_0=3,7$ 1/с оптимальное число коммутаторов доступа $n_0=3$, число межсетевых экранов $n_1=17$, число серверов в четырех группах равно соответственно 4, 4, 4, 29, а $M_i=1$. При тех же условиях оптимальная конфигурация варианта **B** предполагает число сетевых экранов в кластерных группах соответственно равном 2, 2, 2, 5, при том же количестве остального оборудования. Оптимальная структура по варианту **A** обеспечивает среднее время пребывания запросов в системе $T_a=5,382$ с, а по варианту **B** – $T_b=5,743$ с, т.е. объединение сетевых экранов по варианту **A** оказывается предпочтительней.

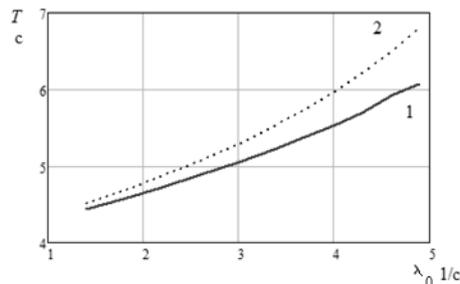


Рисунок. Среднее время пребывания в оптимальных вариантах структур: **A** (кривая 1) и **B** (кривая 2)

Зависимость среднего времени пребывания запросов в системе от интенсивности их поступления λ_0 для вариантов объединения экранов **A** и **B**, формируемых в результате оптимизации, представлена кривыми 1 и 2 на рисунке.

Таким образом, рассмотрена оптимизация многоуровневых вычислительных систем с объединением межсетевых экранов в отказоустойчивые кластеры. При потоке запросов с разделением доступа к различным группам серверов показана предпочтительность объединения всех межсетевых экранов в единый кластер (вариант **A**), причем эта эффективность возрастает с ростом загрузки системы. При низкой загрузке возможна предпочтительность варианта **B**, так как в этом случае затраты на сетевые адаптеры меньше.

1. Романов М. Отказоустойчивая безопасность // Storage News. – 2007. – № 2 (31). – С. 20–24.
2. Богатырев В.А. Динамическое распределение запросов с управляемой функциональной доступностью // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 6. – С. 35–39.
3. Богатырев В.А. К Распределению функциональных ресурсов в отказоустойчивых многомашинных вычислительных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 12. – С. 1–5.

Богатырев Владимир Анатольевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com
Попова Марина Викторовна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, marina24-09@mail.ru
Богатырев Станислав Владимирович – ЕМС2, ст. инженер, gealloc@gmail.com
Кудрявцева Вероника Юрьевна Викторовна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kudryavtsevaveronika@gmail.com
Фокин Андрей Борисович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, tacit@list.ru

УДК 62-83:501.1

**БЕСКОНТАКТНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ
 ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН**

А.Е. Сефeryн, А.Ю. Топчий, А.В. Нестеров

Предложен метод параметрической идентификации математической модели ротора двигателя бесконтактным способом, основанный на акустических измерениях. Экспериментально показано, что точность предложенного метода является приемлемой для инженерной практики.

Ключевые слова: идентификация, MATLAB, шум, выбег ротора двигателя, момент инерции, постоянная времени.

В современной технике известны три способа определения момента инерции ротора двигателя: метод маятниковых колебаний раскачивания ротора двигателя; метод падающего груза; метод свободного выбега с записью осциллограммы скорости при самоторможении. Названные методы сложны в подготовке и проведении измерений [1]. Авторами предложен усовершенствованный метод свободного выбега, в основе которого лежит запись и последующая обработка звука выбегающего ротора. Метод реализован на программно-аппаратном комплексе, состоящем из персонального компьютера (ПК) со звуковой картой и динамического микрофона. Математическая обработка сигналов проведена с использованием пакета MATLAB с пакетами расширения Control System Toolbox, Signal Processing Toolbox и Statistics Toolbox.

Свободный выбег двигателя в соответствии с [2] можно описать дифференциальным уравнением $0 = k \cdot w + j \frac{dw}{dt}$, где k – коэффициент сопротивления вращению; j – момент инерции ротора. Этому

уравнению соответствует передаточная функция $W(s) = \frac{K}{Ts + 1}$, где $T = \frac{j}{k}$ – постоянная времени; s – оператор Лапласа; $K = \frac{1}{k}$ – статический коэффициент передачи.

Определение этих параметров проводилось экспериментально на стенде, состоящем из двигателя постоянного тока с контрольным тахогенератором и динамического микрофона. Выходной сигнал тахогенератора через делитель напряжения подавался на первый канал звуковой карты, выходной сигнал микрофона – на второй канал звуковой карты [3]. Одновременно фиксировались угловая скорость и амплитуда звука (громкость). Найденная таким образом зависимость между угловой скоростью и амплитудой звука при выбеге ротора двигателя позволяет определить постоянную времени по звуку выбегающего ротора. При выбеге двигателя сигнал со звуковой карты записывался командой WAVRECORD [4]. На рис. 1 представлены полученные сигналы.

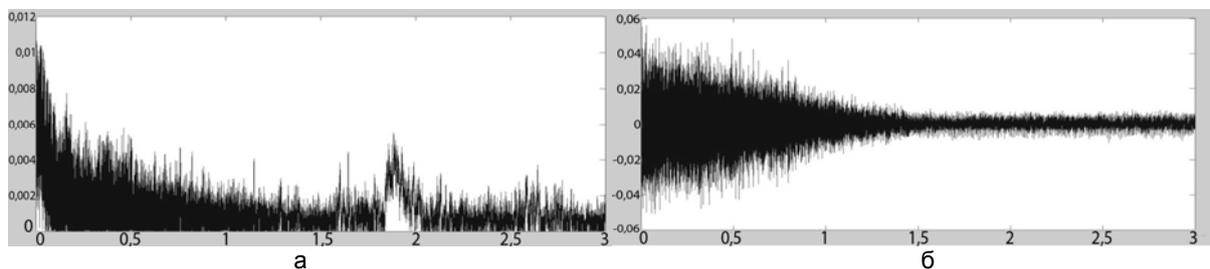


Рис. 1. Сигналы со звуковой карты: выход первого канала (а); выход второго канала (б)

В результате регрессионного анализа установлено, что огибающая временной зависимости сигнала с тахогенератора является экспоненциальной (рис. 2) и описывается уравнением $w = k \cdot \exp(-t / T)$. Огибающая временной зависимости сигнала микрофона – линейная (рис. 3), описывается уравнением $A = -b \cdot t + a$, где A – звуковое давление (дБ); b – коэффициент изменения звукового давления с течением времени; a – начальное звуковое давление. Адекватность регрессионных моделей проверена по критерию Фишера.

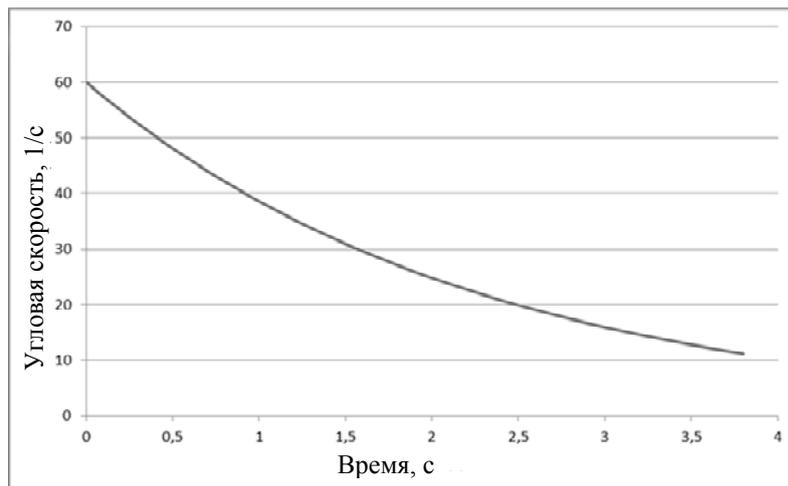


Рис. 2. График выбега двигателя (по тахогенератору) $\omega(t)$

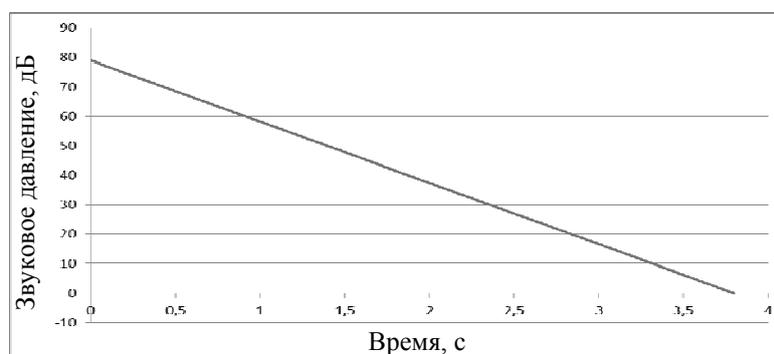


Рис. 3. График уменьшения амплитуды звука при выбеге $A(t)$

Связав громкость звука с угловой скоростью через масштабные коэффициенты μ, τ : $A = \mu \cdot \ln \omega + \tau$, получим

$$A = \mu \cdot \ln k - \mu \cdot \frac{t}{T} + \tau, \quad T = b \cdot \mu.$$

При проведении эксперимента на стенде с двигателем постоянного тока «Динамо сливен» были получены следующие величины: $T=2,267$ с; $J=0,0059$ кг·м²; $k=0,0026$; $\mu=0,0283$; $\tau=88,275$. Сравнение с паспортным значением $J=0,0043$ кг·м² показывает состоятельность предложенного метода, поскольку ошибка не превышает 7%.

Таким образом, предложен усовершенствованный метод свободного выбега, основанный на акустических измерениях. Экспериментально показано, что точность предложенного метода является приемлемой для инженерной практики.

1. Борцов Ю.А., Суворов Г.В., Шестаков Ю.С. Экспериментальное определение параметров и частотных характеристик автоматизированных электроприводов. – Л.: Энергия, 1969. – 105 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 84 с.
3. ГОСТ 11929-87. Машины электрические вращающиеся. – Введ. 01.01.1988. – М.: Стандартинформ, 2009. – 35 с.
4. Лазарев Ю.Ф. MatLAB 5.x. – Киев: Ирина, ВНУ, 2000. – 384 с.

Сеферян Артур Ефремович – Кубанский государственный технологический университет, студент, seartur@mail.ru

Топчий Александр Юрьевич – Кубанский государственный технологический университет, студент, topchiyau@gmail.com

Нестеров Александр Владимирович – Кубанский государственный технологический университет, кандидат технических наук, доцент

УДК 004.852 + 577.112

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ВОДОРОДНОЙ СВЯЗИ В БЕЛКЕ

П.Н. Дружков, Н.Ю. Золотых

Метод градиентного бустинга деревьев решений используется для предсказания стабильности водородной связи в молекуле белка. Данный подход позволяет улучшить качество предсказания по сравнению с методом [1], использующим одиночные деревья решений.

Ключевые слова: деревья решений, градиентный бустинг, водородная связь, белок.

Наиболее распространенным в настоящее время методом определения стабильности водородной связи молекул белка является энергетический подход. К сожалению, он не позволяет с большой точностью прогнозировать время существования связи. Для более точного предсказания можно использовать свойства локального окружения связанных атомов. Например, в [1] стабильность водородной связи предсказывается на основе 32 показателей, что позволяет существенно повысить качество по сравнению с моделью, использующей лишь энергию связи. В качестве модели в [1] используется дерево решений с алгоритмом CART [2], модифицированным с учетом специфики задачи. В настоящей работе вместо одиночного дерева используется градиентный бустинг деревьев решений (gradient boosting trees) [3, 4]. Эксперименты показали, что качество предсказания при этом улучшается.

В качестве меры стабильности водородной связи H возьмем функцию $\bar{\sigma}(H, c, \Delta)$, где c – конфигурация белка в нулевой момент времени; Δ – промежуток времени, для которого рассчитывается стабильность (подробности см. в [1]). Задача заключается в построении аппроксимации σ для этой функции. В качестве предикативных переменных рассматриваются 32 показателя, среди которых есть как постоянные во времени характеристики (атомы, между которыми существует связь, аминокислотные остатки, содержащие эти атомы и т.д.), так и изменчивые кинематические показатели (расстояния, углы и т.д.). Чтобы снизить влияние температурного шума на значения кинематических характеристик, выполняется их усреднение по 50 предыдущим по времени конфигурациям белка.

Обучение модели и оценка ее качества проводилась следующим образом. Поочередно данные о водородных связях траектории каждого белка из 6 рассматриваемых [1] объявлялись тестовыми. Из показателей существующих связей оставшихся 5 траекторий формировалась выборка, на которой производилась настройка модели, причем из данных для каждого белка случайным образом выбиралось лишь 10% от общего числа присутствующих водородных связей. Эксперимент повторялся 10 раз для каждого тестового белка. Таким образом, всего было обучено 60 моделей. Такой подход позволяет оценить не только качество предсказания стабильности связи, но и независимость данного подхода от исследуемого белка.

Использовались следующие параметры алгоритма градиентного бустинга деревьев решений: функция штрафа – квадратичная; число деревьев – 1000; максимальная глубина деревьев – 3; параметр регуляризации (shrinkage) – 0,05; доля обучающей выборки, используемая на каждой итерации алгоритма – 0,6.

На тестовой выборке вычислялись следующие показатели качества модели: корень квадратичной ошибки RMSE(σ) (Root Mean Square Error) и уменьшение ошибки относительно оптимальной константной модели σ_0 : RBED(σ, σ_0) (Relative Base Error Decrease). В таблице приведены средние значения RBED для каждого тестового набора данных для построенной модели и для метода [1], использующего одиночное дерево глубины 5. Применение градиентного бустинга позволило добиться лучших результатов по сравнению с одиночным деревом решений, а, следовательно, и с энергетической моделью. Значительное улучшение получено на данных complex.

| Белок | 1c9oA | 1e85A | 1eia | 1g9oA_1 | 1g9oA_2 | complex |
|------------------------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| Дерево решений [1], % | 46,92 | 59,37 | 42,6 | 50,93 | 45,29 | 37,9 |
| Градиентный бустинг, % | 50,09 | 60,7 | 44,93 | 52,84 | 47,78 | 47,65 |

Таблица. Средние значения RBED для каждого тестового набора (белка)

Работа выполнена в рамках программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», государственный контракт № 11.519.11.4015.

1. Chikalov I., Yao P., Moshkov M., Latombe J.C. Learning probabilistic models of hydrogen bond stability from molecular dynamics simulation trajectories // Journal of Intelligent Learning Systems and Applications. – 2011. – № 3. – P. 155–170.
2. Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and Regression Trees. – Wadsworth, 1983. – 232 P.
3. Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. Technical report. – Stanford University, Dept. of Statistics. – 1999. – 22 p.
4. Дружков П.Н., Золотых Н.Ю., Половинкин А.Н. Программная реализация алгоритма градиентного бустинга деревьев решений // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 1. – С. 193–200.

Дружков Павел Николаевич – Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, студент, druzhkov.paul@gmail.com

Золотых Николай Юрьевич – Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, кандидат физ.-мат. наук, доцент, Nikolai.Zolotykh@gmail.com

УДК 004.89

КОНТЕКСТНЫЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

И.А. Бессмертный, А.С. Балгайракова, Д.В. Ковбаско

Развивается контекстный подход к представлению и извлечению знаний в интеллектуальных системах, обеспечивающий автоматическое расширение контекста во время выполнения поискового запроса.

Ключевые слова: контекст, интеллектуальные системы, допущение открытого мира.

Интеллектуальные системы традиционно дискриминируются в зависимости от используемого допущения открытого или замкнутого мира. В замкнутом мире применяется принцип «отрицание как неудача» (negation as failure), часто приводящий к ложным выводам. При допущении открытого мира результат умозаключения, вытекающего из отсутствия факта, порождает состояние «неизвестно». Однако возведение концепции открытого мира в абсолют может привести к тому, что единственный ответ, который сможет дать информационная система – это сократовское «Я знаю, что ничего не знаю». Развитие концепции семантической паутины делает возможным создание глобальной интеллектуальной системы [1], для которой извлечение знаний представляет более сложную проблему, чем наполнение контентом, что делает проблему логического вывода в сложных интеллектуальных системах весьма актуальной.

В настоящей работе предлагается контекстный подход к когнитивным рассуждениям, заключающийся в том, что каждая аксиома в базе знаний привязывается к контексту c , в котором является истинной. Множество контекстов $C = \{c\}$ образует иерархическую структуру. Если факт принадлежит некоторому контексту, то его истинность сохраняется в контекстах нижних уровней, но не наоборот. Подобный подход реализован в проекте СУС компании СуСорр (www.suc.com) в виде микротеорий. Микротеория объединяет в себе множество знаний, относящихся к данной предметной области, и поисковый запрос ограничивается ею, реализуя тем самым допущение замкнутого мира. Кроме того, необходимость явного указания микротеории в качестве одного из атрибутов поискового запроса делает невозможной автоматическую генерацию запросов интеллектуальным агентом, поскольку только разумный выбор контекста определяет успех поиска решения.

Отличие подхода авторов состоит в том, что семантическая сеть, описывающая базу знаний некоторого контекста, может содержать понятия из других контекстов. Такие понятия оформляются в виде внешних ссылок вида $\text{ext}(a, c)$, где a – атом, принадлежащий контексту c . Если в ходе выполнения запроса разворачивается вершина семантического графа с внешней ссылкой, происходит переключение контекста, и дальнейшие рассуждения выполняются в новом контексте. Тем самым обеспечивается автоматическое расширение контекста за счет внешних атомов, вовлекаемых в процесс рассуждений. Результатом поискового запроса будет не только установление истинности или ложности проверяемой гипотезы или присвоение значений переменным, но также и уровень контекста, на котором решение найдено.

Таким образом, предлагаемый подход с управляемым контекстом позволяет автоматически расширять пространство поиска решений, делая поиск доступным для интеллектуального агента. Данный подход в настоящее время развивается в программе Semantic, предназначенной для исследования методов онтологического инжиниринга и визуализации знаний, а также в лабораторном практикуме дисциплин «Искусственный интеллект» и «Интеллектуальные системы» [2].

1. Бессмертный И.А. Семантическая паутина и искусственный интеллект // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 6 (64). – С. 77–83.
2. Bessmertny I.A. Knowledge Visualization Based on Semantic Networks // Programming and Computer Software. – М., 2010. – V. 36. – № 4. – P. 197–204.

Бессмертный Игорь Александрович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, igor_bessmertny@hotmail.com

Балгайракова Аида Саиновна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, aido4ka@mail.ru

Ковбаско Дмитрий Васильевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, dimsonkz@yandex.ru

SUMMARY

**OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES
SELECTION METHODOLOGY OF OPTIMAL LENS MOUNTING MODE
IN COMPUTER-AIDED DESIGN**

A. Kolpakov, N. Tolstoba

The article deals with optimal lens mounting mode selection of round optics details in computer-aided design. This process requires formalization and mathematical model creation implementing solution selection. Technique of optimal solution selection is suggested.

Keywords: methodology, optimal solution selection, mounting mode, computer-aided design.

Andrey Kolpakov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, group6300@gmail.com

Nadezhda Tolstoba – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, nadinet@aco.ifmo.ru

**ELLIPSOMETRIC RESEARCH MODEL OF THE OPTICAL GLUE CONNECTIONS
CHARACTERISTICS**

M. Aleksandrov, Yu. Nagibin, V. Trofimov, M. Shvanova

An opportunity to carry out researches of the glue connections stress state for the optical parts with the help of the compensatory type ellipsometer, working at PCSA scheme, is considered. Ellipsometric research mathematical model of the induced birefringence in connection layer caused by the integral effect of photoelasticity is described.

Keywords: glue connection, stress state, ellipsometry, connection layer, induced birefringence, photoelasticity.

Maxim Aleksandrov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, max.alx@gmail.com

Yuri Nagibin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, nagibin77@mail.ru

Vladimir Trofimov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, troftu@mail.ru

Maria Shvanova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, shvanova_m@mail.ru

**RADIATION LOSS DETERMINATION ON THE OPTICAL ELEMENTS BY ELLIPSOMETRY AND
IMPULSE PHOTOMETRY METHODS**

M. Aleksandrov, T. Danilova, P. Belomutskaya, I. Khramtsovsky

Ellipsometric method of standard elements certification for spectrophotometrical equipment has been considered. Comparison of certification results of standard elements for spectrophotometrical equipment by ellipsometric method with the data obtained by impulse photometry method has been carried out. Particularities of the temporal change for standard elements photometric characteristics in petroleum ether and in the atmosphere have been determined under normal conditions.

Keywords: ellipsometry, impulse photometry, radiations loss.

Maxim Aleksandrov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, max.alx@gmail.com

Tat'yana Danilova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, Tadia@yandex.ru

Polina Belomutskaya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, itpao@mail.ru

Igor Khramtsovsky – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, leading engineer, PhD, Tadia@yandex.ru

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

**3D RECONSTRUCTION AND VISUALIZATION OF MICROSCOPIC IMAGES FROM
MULTIFOCUS IMAGE SEQUENCE**

A. Averkin, A. Potapov, A. Rozhkov

A method is proposed for depth field reconstruction from a set of layers – microscopic images obtained with different focus length. The method is based on local value estimation of gradient amplitude field dispersion. Analysis of its distribution in different layers leads to estimation of distance to the corresponding scene point and

to separation of object and background. Visualization system of reconstructed depth field and sharp image is implemented.

Keywords: shape from focus, microscopic images, local dispersion.

Anton Averkin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, ant-averkin@rambler.ru

Alexey Potapov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., pas.aicv@gmail.com

Alexey Rozhkov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, alexisrozhkov@gmail.com

RED CELLS COUNT METHOD ON BLOOD SMEARS IMAGES

A. Dyrnayev

Within the framework of blood preparations computer analysis the problem of red cells count on images obtained by a microscope often arises. The article deals with segmentation method of such images based on borders detection by Canny method with the following determination of curves centers which are in return expected to be the cells centers. The method is stable to cells structure, texture and colour and gives the possibility to count cells even overlapping each other due to the images disturbances.

Keywords: cells number count, digital microscopy, images segmentation.

Alexey Dyrnayev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, dirnalex@yandex.ru

SPECTRAL-TEMPORAL EVOLUTION OF THE ELECTRICAL FIELD OF TERAHERTZ PULSE BY FRAUNHOFER SLIT DIFFRACTION

M. Kulya, Ya. Grachev, A. Gorodetsky, V. Bespalov

Time dependencies of the electric field amplitude for terahertz electromagnetic pulse of a few oscillations for various angles of slit diffraction in the far field are theoretically and experimentally obtained. Significant changes in a temporary form of the electric field of pulse with the increasing of diffraction angle have been revealed, as well as corresponding changes in the spectrum. Comparison of the findings shows a good agreement of calculations and experimental results. Obtained outcomes can be used in pulse terahertz optics and spectroscopy.

Keywords: pulse optics from a few oscillations of the electric field, pulse terahertz radiation, slit diffraction.

Maxim Kulya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, maxk2350@yandex.ru

Yaroslav Grachev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, gachev_y@mail.ru

Andrei Gorodetsky – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, scientific researcher, PhD, Associate professor, andrei.gorodetsky@gmail.com

Victor Bespalov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, head researcher, D.Sc., Professor, victorbespaloff@gmail.com

COMPONENTRY AND APPLIANCIES OF TECHNICAL SYSTEMS PHYSICAL PROCESSES RESEARCH IN THE PULSE XENON LAMP WITH THE PUMP CURRENT LIMITATION BY EXTERNAL ELECTRICAL CIRCUIT

Yu. Mandryko, V. Togatov

The article deals with the physical processes research while the pulse forming of the pump current in the plasmic channel of the pulse xenon lamp in the pump current limitation mode by external electrical circuit.

Keywords: pump current pulse, plasmic channel, electrical circuit.

Yury Mandryko – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior lecturer, mandryko1@rambler.ru

Vyacheslav Togatov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, v.togatov@mail.ru

UNIVERSAL ANALYTICAL COMPLEX ON THE BASIS OF ATOMIC - EMISSION SPECTROMETER WITH INDUCTIVELY COUPLED PLASMA AND HYDRIDE GENERATOR

E. Bykovskaya, I. Maksakova

The paper addresses the need for new measurement procedure of mass concentration of toxic metals in water samples. Due to these reasons new universal analytic complex based on atomic-emission spectrometer with inductively coupled plasma and hydride generator was developed. Spectrometer operating modes with hydride generator and without it were estimated. Universal analytic complex work was investigated in dependence with inert carrier-gas feeding velocity. It was established that researching should be continued for determining reagent dosing for sensitiveness decreasing and working range increasing. It will allow detecting polluting substances at low range of content in view of natural background radiation dose with a higher sensitiveness and accuracy.

Keywords: atomic-emission spectrometry, hydride generation, arsenic, antimony, environmental monitoring, measurement procedure.

Elena Bykovskaya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, brownies@mail.ru

Irina Maksakova – All-Russia D.I. Mendeleev Scientific and Research Institute for Metrology (VNIIM), sector head, imax@b10.vniim.ru

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS WATCHING SYSTEM OF THE COMBINED CONTROL

V. Nikiforov, G. Luk'yanova

The article deals with synthesis of the tracking system providing asymptotic reproduction of a task signal, generated by the linear command generator. The offered decision doesn't demand measurement of vector coordinates of the command generator condition and is based on the special observer of task signal derivatives application.

Keywords: internal model, observer, watching system, system of the combined control.

Vladimir Nikiforov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Vice-chancellor, D.Sc., Professor, nikiforov@mail.ifmo.ru

Galina Luk'yanova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of the postgraduate study, PhD, gal-lou@yandex.ru

MAIN FEATURES OF THE ELECTROMAGNETIC FIELDS STRUCTURE GENERATED IN THE LOWER IONOSPHERE GROUND-LEVEL SOURCES. NUMERICAL RESULTS

S. Rybachek, M. Belyansky

This paper is a continuation of the article by S. Rybachek and M. Belyansky "Main features of the electromagnetic fields structure generated in the lower ionosphere by low-frequency ground-level sources" and presents the results of numerical calculations and analysis of electric and magnetic fields in the lower ionosphere. The fields structure depending of the height of the receiver, propagation conditions, the distances between corresponding points and frequency are being studied.

Keywords: electromagnetic fields, anisotropic ionosphere, the low-frequency antennae.

Svetlana Rybachek – Saint Petersburg State University, Associated Professor, PhD, Associated Professor, rybachek_st@mail.ru

Maxim Belyansky – Saint Petersburg State University, postgraduate, maxim_belyansky@mail.ru

ANALYSIS OF NOTICEABLE RADAR STATIONS SIGNALS BASED ON COMPLEX TIME- FREQUENCY DISTRIBUTION METHOD

A. Korotkov

Applying only traditional time-frequency analysis (TFA) techniques, based on Fourier transform, is often not efficient for analysis of noticeable radar stations signals. The article shows that the best result can be reached only by applying the complex method of TFA, based on three different TFA methods. It will give us the possibility to take over the disadvantages of one method by the advantages of the others.

Keywords: time-frequency analysis, radar signals, wavelet analysis, Wigner transform.

Andrey Korotkov – Research Institute "Vector", JSC, engineer, Andrey.k0206516@mail.ru

SPECTRUM FORMATION OF SINGULAR VALUES FOR THE SIMPLE STRUCTURE SQUARE MATRIX

T. Akunov, D. Biryukov, N. Dudarenko, M. Polyakova, A. Ushakov

Possibility of singular values spectrum formation for a simple structure square matrix is investigated. A link of these singular values spectrum with its eigenvalues spectrum defined by condition number of modal matrix is used. The problem of singular values placement design is solved by use of algorithmic possibilities of the generalized modal control. An example is given.

Keywords: modal decomposition, singular value decomposition, singular values, eigenvalues, eigenvector, condition number, generalized modal control.

Taalaybek Akunov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, doctoral candidate, PhD, takunov@mail.ru

Dmitry Biryukov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, quaint03@mail.ru

Natalia Dudarenko – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, doctoral candidate, PhD, dudarenko@yandex.ru

Mayya Polyakova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, 12noch@mail.ru

Anatoly Ushakov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, Ushakov-AVG@yandex.ru

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES ANALYSIS OF BLUR AND NOISE INFLUENCE ON DIGITAL IMAGE QUALITY

V. Bezzubik, N. Belashenkov, V. Nikiforov

The combined method of evaluation of digital image contrast and sharpness is proposed. Analysis of blur and noise influence on digital image quality is carried out. The dependences of image contrast and sharpness on defocusing under different levels of noise are calculated. The joint consideration of contrast and sharpness for digital image quality evaluation is found to be important precondition.

Keywords: digital image processing, contrast, sharpness, defocusing, noise.

Vitaly Bezzubik – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, scientific researcher, bezzubik@mail.ru

Nickolay Belashenkov – Public limited company “LOMO”, Assistant of technical director, PhD, belashenkov@gmail.com

Vladimir Nikiforov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Vice-chancellor, D.Sc., Professor, nikiforov@mail.ifmo.ru

PROGRAMMING METHOD OF TOP-LEVEL FINITE AUTOMATA CREATION FOR THE UNMANNED AIRPLANE MODEL CONTROL BY TRAINING EXAMPLES

S. Kazakov, F. Tsarev, A. Shalyto

Finite automata system for the complex behavior objects control is described in the paper. It consists of top-level finite automaton used for switching between control modes and low-level automata for the unmanned airplane control in one mode. This work is a continuation of low-level automata creation study by genetic programming algorithm based on training examples. The article deals with top-level finite automata creation using training examples and already created low-level automata. So genetic programming isn't used. Experimental investigation results of the suggested method are given.

Keywords: finite automata, unmanned airplane.

Sergey Kazakov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, svkazakov@rain.ifmo.ru

Fedor Tsarev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, fedor.tsarev@gmail.com

Anatoly Shalyto – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, shalyto@mail.ifmo.ru

REGIONAL POPULATION MODEL OF DRUG ADDICTION EXTENSION

S. Mityagin, Yu. Zakharov, A. Boukhanovsky, P.M.A. Sloot

The paper presents the mathematical model creation of the population dynamic and drug addiction forecasting in the region territory. The aim is defining the structure, status and trends in drug addiction for quick and perspective analysis of possible trends. There are numerical forecasting results in the best and worst scenario case. The results interpretations in terms of economic and psychological well-being of the society are considered.

Keywords: drug situation, the Markov model, monitoring, demographic situation, development scenario.

Sergey Mityagin – Saint Petersburg Information-Analytical Center, leading analytical specialist, Mityagin@iac.spb.ru

Yury Zakharov – Saint Petersburg Information-Analytical Center, Director, PhD, Professor, zaharov@iac.spb.ru

Alexander Boukhanovsky – eScience Research Institute of Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Director, D.Sc., avb_mail@mail.ru

Petrus Maria Arnoldus Sloot – Amsterdam University, Professor, PhD, Professor, p.m.a.sloot@uva.nl

RELIABILITY OF THE DUPLEX COMPUTER COMPLEXES

V. Bogatyrev, S. Bashkova, V. Bezzubov, A. Polyakova, E. Kotel'nikova, I. Golubev

The Markov reliability model for the restored duplex computer complex functioning in a loading division mode is offered, stationary and non-stationary factors of readiness are estimated and factor of efficiency preservation as well.

Keywords: fault tolerance, duplex complex, loading division, reliability, factor of efficiency preservation.

Vladimir Bogatyrev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Svetlana Bashkova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, sveta.bashkova@gmail.com

Vladimir Bezzubov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, bezzubov-vf@yandex.ru

Anastasiya Polyakova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, axel.denielt@gmail.com

Elena Kotel'nikova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, elka842@yandex.ru

Ivan Golubev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, golubev@mail.ru

FAST SEQUENTIAL INTEGER RADIX-4 DIVIDER

A. Rumyantsev

One-clock divisor and dividend normalization unit, which occupies slightly more area compared to the sequential (multi cycle) normalization units is designed. A novel method to determine the overflow situation in signed and unsigned integer division, which minimizes the hardware resources footprint and reduces their energy consumption, is proposed. The various architectural options for pipelining the integer radix-4 divider, using the designed one-clock normalization unit and proposed overflow detection method, are compared.

Keywords: integer radix-4 division, normalization of the dividend and divisor, overflow in integer signed and unsigned division.

Alexander Rumyantsev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, darkstreamray@gmail.com

LASER SYSTEMS AND BIOMEDICAL TECHNOLOGIES

ROUGHNESS PARAMETERS AND SURFACE DEFECTS DETECTION OF AIRCRAFT PARTS WITH SPIRAL LASER BEAMS

P. Pavlov, N. Petrov, A. Malov

The method of speckle patterns of optical radiation with the use of spiral laser beams to determine the parameters of roughness and surface flaw detection of optically opaque parts of the aircraft. Diagrams for correlation interval dependence of recorded speckle patterns from high roughness parameters and controlled surface defect depth are obtained. During the simulation it is set up and experimentally confirmed that the use in probing the wave front of the spiral increases the sensitivity of the speckle patterns.

Keywords: roughness, flaw detection, speckle, correlation, spiral beams, laser.

Pavel Pavlov – Military Aviation Engineering University (Voronezh), postgraduate, pashok8208@mail.ru

Nikolay Petrov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior scientific researcher, PhD, Nickolai.petrov@gmail.com

Alexander Malov – “Technologies of Progress Ltd.” (Irkutsk), Deputy director for scientific activity, D.Sc., Professor, cohol2007@yandex.ru

THE ABSORPTION SPECTRUM OF RESTORED NICOTINAMIDE ADENINE DINUCLEOTIDE OBTAINED BY EXPERIMENT AND QUANTUM-CHEMICAL COMPUTATION

E. Kon'kova

Ab initio computation of the absorption spectrum of restored nicotinamide adenine dinucleotide is carried out in the present work. Spectra of the coenzyme segments were calculated by the semi empirical method. Comparison of results obtained by semi empirical and *ab initio* methods shows that simplification (division into segments) does not give essential error. Calculation and experimental data are in good agreement. The division of complex organic molecules into segments is useful in terms of computation time decrease.

Keywords: adenine, nicotinamide, NADN, absorption spectrum, *ab initio* and semi empirical methods.

Elena Kon'kova – Volgograd State University, postgraduate, konelepet@mail.ru

EARLY CARIES DIAGNOSIS OF TEETH HARD TISSUES BY TERAHERTZ RANGE LASER RADIATION

A. Ezerskaya, I. Romanov, O. Smolyanskaya, Ya. Grachev

The angular distribution of transmitted and reflected terahertz signal and the terahertz transmission and reflection spectra of human hard tissues (normal and with caries) were investigated. Characteristic terahertz absorption lines were found, which might allow diagnosing the disease on initiatory stages. The carious spot increases the reflectivity of the terahertz signal, which provides a unique opportunity to diagnose caries quite accurate *in vivo* on initiatory stages.

Keywords: terahertz spectroscopy, terahertz photometry, diagnosis, dental caries.

Anna Ezerskaya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, a.a.ezerskaya@gmail.com

Il'ya Romanov – Tomsk State University, postgraduate, roil@elefot.tsu.ru

Olga Smolyanskaya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, o_smolyanskaya@mail.ru

Yaroslav Grachev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, grachev_y@mail.ru

INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS
AN INTEGRATED INFORMATION ENVIRONMENT FOR REGIONAL DEVELOPMENT SAFETY
MANAGEMENT SUPPORT: ARCHITECTURE AND FORMATION TECHNOLOGIES

A. Masloboev, M. Shishaev

The paper considers global safety management information and analytical support problems of the regional scale socio-economic systems development and their solution directions based on cognitive information technologies and simulation toolkits. An agent-based integrated information environment conceptual model for global safety management support of the regional development has been designed. The architecture and formation technologies of problem-oriented distributed information systems used for regional safety management support on the basis of peer-to-peer telecommunications networks and multi-agent approach, which provide the possibility for heterogeneous information resources and systems integration within the framework of unified information environment of the region, have been proposed.

Keywords: integrated information environment, cognitive approach, information support, management, global safety, regional development, agent-based technologies, peer-to-peer distributed system.

Andrey Masloboev – Establishment of Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, PhD., Associate professor, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

Maxim Shishaev – Establishment of Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Head of Regional Information Systems Laboratory, D. Sc., Professor, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS
DEVELOPMENT AND APPLICATION OF COMPLEX AUTOMATED METHODS FOR
KINEMATIC, DYNAMIC AND STRENGTH ANALYSIS TO SOLVE ENGINEERING PROBLEMS

A. Terletsкая, N. Raits, I. Limareva, E. Fomicheva, E. Murykh

Application possibility of modern CAE-systems (ADAMS, ANSYS) for carrying out kinematic, dynamic and strength analyses is considered. The developed technique of the complex automated analysis allows carrying out the analysis of difficult mechanisms with the big accuracy in shorter terms. Researches in the field of spatial mechanisms, occurrence of contact pressure, and destruction mechanics of welded designs are made on the basis of the developed technique.

Keywords: computer-aided analysis, modeling, mechanical systems, contact stresses.

Anastasiya Terletsкая – Karaganda State Technical University, senior teacher, ternast@mail.ru

Nadezhda Raits – Karaganda State Technical University, senior teacher, nadyareiz@mail.ru

Inna Limareva – Karaganda State Technical University, senior teacher, innalim21@mail.ru

Elena Fomicheva – Karaganda State Technical University, senior teacher, fomicheva_lena@mail.ru

Elena Murykh – Karaganda State Technical University, senior teacher, Murykh@mail.ru

INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION
IMPLEMENTATION OF THE VALUATION METRICS FOR PRODUCTION TECHNOLOGICAL
BACKGROUND

D. Kulikov, E. Yablochnikov

The article deals with the valuation methodology for the automation level of the production technological background using “automation area”. The set of metrics is offered, including volume automation coefficient, complete automation coefficient and coefficient of readiness. Different types of projects and their valuation by the offered metrics are described.

Keywords: production technological background, automation level, metrics for automation level valuation.

Dmitry Kulikov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, ddkulikov@rambler.ru

Evgeny Yablochnikov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, PhD, Associate professor, eugeniy@bee-pitron.spb.su

IMPLEMENTATION OF THE VIRTUAL ENTERPRISE COMMON INFORMATION FIELD

M. Afanasiev, A. Gribovsky

Implementation features of the virtual enterprise common information field in view of modern information technologies application, as well as multi-agent cluster control model are considered.

Keywords: multi-agent technologies, virtual enterprise, common information field.

Maksim Afanasiev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, ichiro.kodachi@gmail.com

Andrey Gribovsky – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, griandrey@yandex.ru

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION ADAPTIVITY IN SIMULATORS

S. Sergeev

The article contains a general overview of modern approaches to the adaptive regimes forming in the ergatic systems stimulators. We discuss the limits associated with classical stimulator-constructing paradigm, based on effective case adaptation criteria. We provide the new approaches to adaptation mode choice that takes into account the self-organizing processes of learning environment.

Keywords: adaptation, mutual adaptation, adaptive simulators, adaptation modes, learning environments.

Sergey Sergeev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Laboratory head, D.Sc., ssfpost@mail.ru

TEST GENERATION FOR PROGRAMMING CHALLENGE TASKS IN GRAPH THEORY BY EVOLUTION STRATEGIES

M. Buzdalov

An automated method for generation of tests against inefficient solutions for programming challenge tasks in graph theory is given. This method is based on evolution strategies. The use of the method in generation of new tests for a programming challenge task from the Internet archive acm.timus.ru is described.

Keywords: evolution strategies, programming challenges, testing.

Maxim Buzdalov - Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, mbuzdalov@gmail.com

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT SOFTWARE IMPLEMENTATION ARCHITECTURE OF AN AUTOMATED TRADING SYSTEM WITH TECHNICAL ANALYSIS

A. Lukashev

The article analyzes the existing approaches to the development of automated trading systems and their capabilities. A variant of the software solution architecture for a securities trading system which is using technical analysis is considered.

Keywords: algorithm, automated system, technical analysis, indicator, securities, software architecture.

Alexander Lukashev - Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", postgraduate, lukashev.alexander@gmail.com

NUMERICAL ANALYSIS OF THE FORECAST ACCURACY INFLUENCE OF THE PASSENGERS' DEMAND ON THE AIR TICKETS SALES EFFICIENCY IN VIEW OF OVERBOOKING

K. Mozgovaya, M. Yablochkina, G. Fridman

This work presents numerical results of air tickets sales computer simulation taking into account the overbooking and passengers' preflight registration with compensation in refusal from place giving in the plane. The analysis of accuracy influence on the forecast of passengers' demand for efficiency of various sales strategies is made. It is established that the account of overbooking can lead to the general profit increase connected with tickets sale by 5-20 % depending on the demand forecast accuracy.

Keywords: forecast of passengers' demand, virtual (excessive) capacity of the airplane, non-appearance for the registration, tickets return, compensation.

Kristina Mozgovaya – Saint Petersburg State University of Economics and Finance, postgraduate, kristina.mozg@gmail.com

Maria Yablochkina – Saint Petersburg State Marine Technical University, student, sour-apple@mail.ru

Gregory Fridman – Saint Petersburg State Marine Technical University, Professor, D.Sc., Associate professor, gregory_fridman@list.ru

BRIEF REPORTS

REFERENCES AUTOMATIC SYNTHESIS IN DISSERTATIONS BY BIBTEX

V. Melnikov, P. Kasikova, M. Belinka

The problem of automatic synthesis and formatting of reference lists in dissertations and other publications satisfying to the latest national standards is considered. Some aspects of a new BibTeX style file development and application are considered.

Keywords: BibTeX, TeX, automation, computer make-up systems.

Vitaly Melnikov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, PhD, Associate professor, melnikov@mail.ifmo.ru

Polina Kasikova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Assistant, mo-only@yandex.ru

Maksim Belinka – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, prosvetv@yandex.ru

3D MODELING OF THE PRINTED CIRCUIT BOARD

O. Kuznetsova, E. Romanova

Analysis of 3D modeling methods of the printed circuit board in CAD systems is done. Main advantages and disadvantages are given. Conclusion about application of 3D modeling methods for the printed circuit board is given.

Keywords: printed circuit board, 3D model, CAD systems.

Olga Kuznetsova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, olunchik_1989@mail.ru

Eva Romanova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, eva_rom@mail.ru

OPTIMIZATION OF COMPUTING SYSTEMS WITH ASSOCIATION OF GATEWAY SCREENS IN FAULT TOLERANCE CLUSTERS

V. Bogatyrev, M. Popova, S. Bogatyrev, V. Kudryavtseva, S. Fokin

Optimization of the multilevel computing system is considered with association of gateway screens in fault-tolerance clusters.

Keywords: fault-tolerance, cluster, gateway screen, optimization, server.

Vladimir Bogatyrev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Marina Popova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, marina24-09@mail.ru

Stanislav Bogatyrev – EMC², senior engineer, realloc@gmail.com

Veronika Kudryavtseva – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, kudryavtsevaveronika@gmail.com

Sergey Fokin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, tacit@list.ru

NON-CONTACT PARAMETER IDENTIFICATION OF ROTATING MACHINES

A. Seferyan, A. Topchiy, A. Nesterov

We propose a method for parameter identification of engine rotor mathematical model by non-contact way based on acoustic measurements. It is experimentally shown that the precision of this method is acceptable for engineering practice.

Keywords: identification, MATLAB, noise, engine rotor runaway, moment of inertia, time constant.

Artur Seferyan – Kuban State Technological University, student, seartur@mail.ru

Alexander Topchiy – Kuban State Technological University, student, topchiyau@gmail.com

Alexander Nesterov – Kuban State Technological University, lecturer, PhD, Associated professor

GRADIENT BOOSTING TREES METHOD FOR PREDICTION OF PROTEIN HYDROGEN BOND STABILITY

P. Druzhkov, N. Zolotikh

Gradient boosting trees method is used for prediction of hydrogen bond stability in protein molecule. This approach allows improving the prediction quality in comparison with the method [1] that uses single decision trees.

Keywords: decision trees, gradient boosting, hydrogen bond, protein.

Pavel Druzhkov - Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, student, druzhkov.paul@gmail.com

Nikolay Zolotikh - Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, Associate professor, PhD, Associate professor, Nikolai.Zolotikh@gmail.com

CONTEXT APPROACH TO THE IMPLEMENTATION OF INTELLECTUAL SYSTEMS

I. Bessmertny, A. Balgayrakova, D. Kovbasko

The paper develops a context approach to knowledge representation and acquisition in intellectual systems providing an automatic context extending during the query.

Keywords: context, intellectual systems, open world assumption.

Igor Bessmertny – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate Professor, igor_bessmertny@hotmail.com

Aida Balgayrakova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, aido4ka@mail.ru

*Уважаемые читатели!
Уважаемые авторы!*

Обращаем Ваше внимание, что с января 2012 года журнал будет выходить под названием **«Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики»**.

Читатели, оформившие подписку на первое полугодие 2012 года, будут получать журнал без переоформления подписки.

Журнал издается с 2001 года как периодическое научное и научно-образовательное издание. Журнал входит в утвержденный Высшей Аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук». Все публикации в журнале проходят рецензирование. Периодичность издания составляет 6 выпусков в год, объем каждого выпуска - 140 страниц.

Тематика журнала остается прежней. Журнал печатает материалы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения и новых информационных технологий в России и за рубежом по следующим направлениям: информационные технологии, информационно-телекоммуникационные системы, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, системный анализ и математическое моделирование, системы автоматизированного проектирования, оптика, оплотехника и приборостроение, физика твердого тела, микроэлектроника, нанотехнологии, мехатроника, методы и системы защиты информации, биомедицинские технологии, экономика и финансы.

Издание зарегистрировано как сериальное в Международном центре ISSN, номер ISSN 1819-222X, свидетельство МНС РФ 1027806868154 от 24 января 2005 года, а также в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

На журнал **«Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики»** можно оформить подписку в любом отделении связи. Подписной индекс остался без изменений - **47 197**, по каталогу агентства Роспечать (Газеты. Журналы).

Адрес редакции – Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, комн. 330.

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



ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Редакция принимает к рассмотрению оригинальные (нигде ранее не опубликованные, за исключением материалов научных конференций) работы по тематике журнала, представляющие новые научные результаты, полученные лично авторами статьи. Публикуются также обзоры, характеризующие современное состояние актуальных направлений развития науки и техники, сообщения о научных конференциях, материалы научных дискуссий и рецензии на новые книги.

Тематика журнала включает разделы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения по направлениям: оптика, оптические системы и технологии, оптическое материаловедение и нанотехнологии, информационные и компьютерные системы и технологии, методы и системы защиты информации, системный анализ, системы автоматического управления, мехатроника, системы автоматизированного проектирования, микроэлектроника, биомедицинские технологии. В качестве дополнительных разделов журнал также публикует работы по экономике и финансам.

Материал статьи должен быть изложен в соответствии со следующей структурой.

В аннотации, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо кратко (объемом до 100 слов) изложить научное содержание статьи.

Во введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, краткий анализ известных из научной литературы решений, критику их недостатков и преимущества (особенности) предлагаемого подхода.

В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи может быть разбит на отдельные разделы: «Постановка задачи», «Основной результат», «Результаты моделирования» и т.п.

В заключении необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований.

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

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Объем статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 6 страниц.

Оригинал-макет статьи выполняется в редакторе Word for Windows. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 pt, межстрочный интервал одинарный, поля сверху 20 мм, остальные поля 25 мм. Абзацный отступ 10 мм.

Аннотация печатается шрифтом Times New Roman 10 обычный, межстрочный интервал одинарный, выравнивается по ширине страницы. В аннотации не допускаются ссылки на цитированную литературу и громоздкие формулы.

Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, отделяется от предыдущего раздела полutorной пустой строкой, а от последующего текста одной пустой строкой.

Название подраздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, пустыми строками не отделяется.

Формулы набираются в редакторе Microsoft Equation Ed. 3.0. Параметры стиля: текста — Times New Roman, прямой; функции — Times New Roman, прямой; переменной — Times New Roman, наклонный; греческих букв — Symbol, прямой; символов — Symbol, прямой; матрицы-вектора — Times New Roman, прямой, полужирный; чисел — Times New Roman, прямой. Размеры: обычный — 12 pt, крупный индекс — 10 pt, мелкий индекс — 8 pt, крупный символ — 16 pt, мелкий символ — 12 pt. Отдельные переменные в тексте допускается набирать в текстовом режиме с соблюдением требований, указанных для формул. Разделительный знак десятичных дробей — запятая.

При оформлении рисунков и графиков используется шрифт Times New Roman. Стиль написания переменных должен соответствовать требованиям к основному тексту.

Используются только единицы измерения, соответствующие системе СИ.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Нумерация позиций — согласно очередности ссылок в тексте.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Более подробную информацию смотрите на сайте <http://books.ifmo.ru/ntv/>

Подписано к печати 15.10.2011 Тираж 350 экз. Заказ № 24(76)

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

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

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

Selection methodology of optimal lens mounting mode in computer-aided design
Ellipsometric research model of the optical glue connections characteristics

A. Kolpakov, N. Tolstoba 1
M. Aleksandrov, Yu. Nagibin, V. Trofimov,
M. Shvanova 4
M. Aleksandrov, T. Danilova, P. Belomutskaya,
I. Khramtsovsky 9

Radiation loss determination on the optical elements by ellipsometry
and impulse photometry methods

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

3D reconstruction and visualization of microscopic images from multifocus image sequence
Red cells count method on blood smears images
Spectral-temporal evolution of the electrical field of terahertz pulse by Fraunhofer slit diffraction

A. Averkin, A. Potapov, A. Rozhkov 12
A. Dyrnayev 17
M. Kulya, Ya. Grachev, A. Gorodetsky, V. Bespalov 22

COMPONENTRY AND APPLIANCES OF TECHNICAL SYSTEMS

Physical processes research in the pulse xenon lamp with the pump current limitation
by external electrical circuit
Universal analytical complex on the basis of atomic - emission spectrometer with inductively
coupled plasma and hydride generator

Yu. Mandryko, V. Togatov 28
E. Bykovskaya, I. Maksakova 34

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

Watching system of the combined control
Main features of the electromagnetic fields structure generated in the lower ionosphere
ground-level sources. Numerical results
Analysis of noticeable radar stations signals based on complex time-frequency distribution method
Spectrum formation of singular values for the simple structure square matrix

V. Nikiforov, G. Luk'yanova 39
S. Rybachek, M. Belyansky 44
A. Korotkov 49
T. Akunov, D. Biryukov, N. Dudarenko,
M. Polyakova, A. Ushakov 53

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

Analysis of blur and noise influence on digital image quality
Programming method of top-level finite automata creation for the unmanned airplane
model control by training examples
Regional population model of drug addiction extension

V. Bezzubik, N. Belashenkov, V. Nikiforov 59
S. Kazakov, F. Tsarev, A. Shalyto 64
S. Mityagin, Yu. Zakharov, A. Boukhanovsky,
P.M.A. Sloom 68
V. Bogatyrev, S. Bashkova, V. Bezzubov,
A. Polyakova, E. Kotel'nikova, I. Golubev 74
A. Rumyantsev 78

Reliability of the duplex computer complexes

Fast sequential integer radix-4 divider

LASER SYSTEMS AND BIOMEDICAL TECHNOLOGIES

Roughness parameters and surface defects detection of aircraft parts with spiral laser beams
The absorption spectrum of restored nicotinamide adenine dinucleotide obtained by experiment
and quantum-chemical computation
Early caries diagnosis of teeth hard tissues by terahertz range laser radiation

P. Pavlov, N. Petrov, A. Malov 84
E. Kon'kova 88
A. Ezerskaya, I. Romanov, O. Smolyanskaya,
Ya. Grachev 92

INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

An integrated information environment for regional development safety management support:
architecture and formation technologies

A. Masloboev, M. Shishaev 98

COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

Development and application of complex automated methods for kinematic,
dynamic and strength analysis to solve engineering problems

A. Terletsкая, N. Raits, I. Limareva, 104
E. Fomicheva, E. Murykh

INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION

Implementation of the valuation metrics for production technological background
Implementation of the virtual enterprise common information field

D. Kulikov, E. Yablochnikov 109
M. Afanasiev, A. Gribovsky 113

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

Adaptivity in simulators
Test generation for programming challenge tasks in graph theory by evolution strategies

S. Sergeev 118
M. Buzdalov 123

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

Software implementation architecture of an automated trading system with technical analysis
Numerical analysis of the forecast accuracy influence of the passengers' demand
on the air tickets sales efficiency in view of overbooking

A. Lukashev 128
K. Mozgovaya, M. Yablochkina, G. Fridman 132

BRIEF REPORTS

References automatic synthesis in dissertations by BibTeX
3D modeling of the printed circuit board
Optimization of computing systems with association of gateway screens
in fault tolerance clusters
Non-contact parameter identification of rotating machines
Gradient boosting trees method for prediction of protein hydrogen bond stability
Context approach to the implementation of intellectual systems

V. Melnikov, P. Kasikova, M. Belinka 138
O. Kuznetsova, E. Romanova 139
V. Bogatyrev, M. Popova, S. Bogatyrev, 140
V. Kudryavtseva, S. Fokin
A. Seferyan, A. Topchiy, A. Nesterov 142
P. Druzhkov, N. Zolotykh 144
I. Bessmertny, A. Balgayrakova, D. Kovbasko 145

SUMMARY

146