

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

Санкт-Петербург
2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

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

Санкт-Петербург

2013 г.

Сборник работ аспирантов НИУ ИТМО, победителей конкурса грантов правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. проф. В.О. Никифорова – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 221 с.

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

ISBN 978-5-7577-0424-1

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

Авторы, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Сегментация и распознавание изображений на основе обучаемых признаковых представлений <i>А.Н. Аверкин</i>	6
Оценивание параметров транспортных средств по показаниям датчиков дорожного покрытия <i>В.М. Бардов</i>	18
Информационные и технологические решения системы централизованного хранения результатов научно-практической деятельности <i>Д.А. Вареников</i>	26
Роль Э. Малли в формировании деонической логики <i>А.В. Глинчикова</i>	35
Сенсор концентрации CO ₂ в атмосфере на основе Фурье-спектрометра <i>А.Л. Итин</i>	42
Траекторное управление автономными мобильными роботами <i>Ю.А. Капитанюк</i>	49
Разработка адаптивных алгоритмов управления для мобильных робототехнических систем <i>А.А. Капитонов</i>	56
Исследование оптико-электронной системы контроля трехмерного изгиба трубопроводов и элементов энергетических установок <i>А.И. Коняхин</i>	61
Микрофлюидная система для исследования биологических объектов <i>И.В. Кухтевич</i>	75
Исследование нелинейных плазмонных наноантенн для управления световыми потоками на наномасштабах <i>Н.С. Лапушина</i>	88
Исследование особенностей формирования полихроматической оптической равносигнальной зоны с помощью RGB-светодиодов <i>А.А. Мараев</i>	93
Идентификация классов транспортных средств с помощью пьезоэлектрических акселерометров <i>Д.Е. Обертов</i>	109
Разработка алгоритмов высоконадежной передачи данных в сетях с гетерогенным резервированием магистралей <i>А.В. Осипов</i>	116
Алгоритмы управления движением механических объектов с неголономными ограничениями в динамическом окружении <i>А.И. Петрик</i>	133
Разработка электромеханических чувствительных элементов для устройств автоматики и систем управления <i>О.И. Пирожникова</i>	148

Исследование и разработка прозрачного оптического нанокomпозиционного клея <i>С.А. Семьина</i>	156
Разработка специальных методик объемного сканирования и обработки данных трехмерных объектов <i>В.О. Тишкин</i>	170
Трехкоординатная автоколлимационная система контроля угловых деформаций промышленных объектов <i>Т.В. Тургалieва</i>	179
Оптические свойства и структурный анализ двумерных квантовых нанокристаллов полупроводника CdSe <i>С.А. Черевков</i>	198
Наностеклокерамики для защиты органов зрения и оптических приборов <i>П.С. Ширинев</i>	209

В 2009 г. нашему вузу по итогам всероссийского конкурсного отбора программ развития университетов была присвоена категория национального исследовательского университета (НИУ). Это высшее учебное заведение, одинаково эффективно осуществляющее образовательную и научную деятельность на основе принципов интеграции науки и образования. Один из важнейших отличительных



Победители конкурса грантов на вручении дипломов

признаков НИУ – наличие высокоэффективной системы подготовки кадров высшей квалификации – аспирантов и докторантов (в том числе, из других вузов), а также переподготовки научных кадров и повышения квалификации.

За прошедшие четыре года реализации программы развития НИУ ИТМО число аспирантов в нашем вузе увеличилось с 456 человек в 2009 г. до 700 человек в 2012 г. Число успешных защит кандидатских диссертаций аспирантами в 2009 г. составило 45, а в 2012 г. – 65. При этом 32 молодых ученых из числа успешно защитившихся в 2012 г. остались на работе в НИУ ИТМО. В университете действует система финансовой поддержки научных достижений молодых ученых и аспирантов. Аспиранты имеют возможность публиковаться в четырех научных журналах, выходящих на базе НИУ ИТМО: «Известия вузов. Приборостроение», «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики», «Оптический журнал» и «Наносистемы: физика, химия, математика». Результаты своих исследований аспиранты докладывают на ежегодной Научно-технической и учебно-методической конференции НИУ ИТМО, на ежегодном Всероссийском конгрессе молодых ученых (организуемом НИУ ИТМО), а также на научных конференциях и семинарах, проводимых факультетами и кафедрами университета.

Важную роль в поддержке научных исследований аспирантов играет ежегодный конкурс грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Аспиранты НИУ ИТМО на протяжении всех лет существования этого конкурса принимали в нем активное участие, благодаря чему по общему числу выигранных грантов наш университет последние годы занимает второе-третье место среди всех вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга.

В настоящий сборник вошли работы аспирантов – победителей конкурса грантов 2012 г. для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга. Представленные работы демонстрируют высокий уровень и широкий диапазон научных исследований, проводимых аспирантами НИУ ИТМО под руководством ведущих ученых вуза.

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



Аверкин Антон Нилович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра компьютерной фотоники и видеoinформатики
E-mail: ant-averkin@rambler.ru

СЕГМЕНТАЦИЯ И РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОБУЧАЕМЫХ ПРИЗНАКОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

А.Н. Аверкин

Научный руководитель – профессор А.С. Потапов

Введение

Аналитический обзор современных литературных источников, касающихся темы проекта, позволил выявить следующие тенденции развития систем компьютерного зрения. Во-первых, они играют ключевую роль не только в процессе взаимодействия робототехнической системы с окружающей средой [1], но и становятся неотъемлемым элементом современных мобильных устройств, к которым предъявляются повышенные требования для адекватного взаимодействия с человеком (реализация так называемого человеко-машинного интерфейса) [2].

Во-вторых, наиболее популярные методы распознавания изображений ориентированы на работу с ограниченным классом объектов, а наиболее широко распространенные методы сегментации, как правило, выполняют поиск некоторых особенностей изображений, имеющих заданную форму, размер или цвет [3, 4, 5]. Иными словами, все данные методы предполагают предварительную настройку ряда параметров, накладывает значительные ограничения на их практическое применение.

Гибкость подобных систем может быть обеспечена лишь возможностью адаптации закладываемых в них алгоритмов и методов к изменяющимся и априорно неизвестным данным. Известно, что адаптация живых организмов к изменяющимся условиям окружающей среды обеспечивается способностью их к обучению, то есть умением использовать опыт при принятии решений.

Самые последние успехи в области компьютерного зрения связаны именно с использованием принципов обучения [6, 7]. Например, для получения новой информации о наблюдаемой сцене объектов системе компьютерного зрения робота необходимо использовать метод сопоставления изображений по ключевым точкам, так как эта операция является эффективной по качеству и по скорости [8]. Важнейшим этапом метода сопоставления изображений является этап формирования дескрипторов ключевых точек [6, 9]. Все обнаруженные ключевые точки описываются уникальным вектором признаков.

подавляющее большинство применяемых на практике методов компьютерного зрения строят признаки ключевых точек по заранее установленной схеме, которая не меняется в процессе выполнения работы. Однако это несовместимо с требованиями, предъявляемыми к современным системам компьютерного зрения, а именно: автономной работе в условиях априорно неизвестной и недетерминированной среды; способности принятия самостоятельных решений без помощи оператора на основе опыта, полученного из обработанной информации.

Основная концепция обучения, изложенная в большинстве рассмотренных научных статей [6, 9], заключается в формировании новых более устойчивых признаков на основе

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

признаков предыдущего уровня путем поэтапного их обучения. В предыдущих работах в рамках этого направления мне удалось достичь положительных результатов [10], что явилось основанием для расширения поля дальнейших исследований.

Таким образом, цель проведенного исследования заключалась в разработке и реализации программных моделей обучения и автоматического построения признаков отдельных областей, относящихся к различным физическим поверхностям (объектам) реального мира, а также построению по изображениям женских лиц признаков, на основе которых можно было бы предсказывать значение субъективной привлекательности лица для конкретного человека.

Для достижения цели работы были сформулированы следующие задачи:

- на основе единственного изображения томограммы сформировать обучающую выборку, состоящую из его локальных областей (ЛО). Для этого набора областей применить метод анализа главных компонент (АГК) и на основе первых компонент построить новое пространство признаков. Найти проекции всех ЛО на векторы нового пространства признаков, после чего выполнить линейную кластеризацию векторов проекций на заданное число классов. Используя информацию о центрах сформированных классов для ЛО изображений, не входивших в обучающую выборку, определить ближайший класс и тем самым выполнить сегментацию этих изображений;

- для набора изображений женских лиц получить оценки их субъективной привлекательности для конкретного человека. На основе исходных изображений и собранных оценок построить пространство признаков. Определить в нем направление, проекция исходных изображений на которое будет хорошо коррелировать со значениями субъективных оценок привлекательности женских лиц для предсказания значений привлекательности произвольных лиц для того человека, который давал первоначальные оценки.

Поставленная цель и решаемые в данной работе задачи являются современными и актуальными в результате возросшей необходимости обеспечения возможности адаптации подобных современных систем к содержанию изображений.

Метод сегментации томографических изображений

Для решения некоторой практической задачи приходится, как правило, не просто использовать один из известных методов сегментации изображения, а настраивать его под содержание конкретных изображений, что накладывает определенные ограничения при работе в условиях неопределенности получаемой информации.

Сформулируем задачу. Исходно имеется лишь одно изображение f томограммы, на базе которого требуется выявить признаки основных присутствующих на нем объектов, для того чтобы с достаточной точностью можно было бы их разделять. Для обнаружения основных элементов, составляющих содержание изображения томограммы, предлагается сформировать на его основе набор из K локальных областей g , с размером стороны s . Эта операция выполняется в скользящем по изображению квадратном окне и позволяет захватить значительное количество особенностей томограммы.

На основе набора таких локальных окрестностей предлагается построить новое пространство признаков, в котором необходимо найти области, отвечающие по своим характеристикам слоям с определенной текстурой на исходных томограммах. Такой способ обработки исходных данных (двумерных томограмм) позволит сформировать новые более

устойчивые характерные признаки областей с разной текстурой. Использование новых признаков позволит повысить эффективность сегментации для новых изображений.

Для построения нового пространства признаков необходимо максимизировать дисперсию между признаками, описывающими M локальных областей исходного изображения:

$$\sum_{i=1}^M ((\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \mathbf{a}_1)^2 \rightarrow \max, \quad (1)$$

где вектор \mathbf{r}_i описывает яркости нормализованного i -го фрагмента исходного изображения вокруг выбранной точки; $i = 1 \dots M$, где M – номер выделенной точки на изображении; \mathbf{x}_0 – вектор средних значений яркости локальных окрестностей по всем выбранным точкам обучающего изображения томограммы; \mathbf{a}_1 – вектор первой главной компоненты.

Необходимо учесть условие нормировки:

$$\sum_{j=1}^N a_{1,j}^2 = 1, \quad (2)$$

где N – размерность вектора первой главной компоненты; $\mathbf{a}_{1,j}$ – j -й компонент вектора первой главной компоненты, причем $j = 1 \dots N$.

Тогда с учетом условия нормировки (2) перепишем выражение (1) следующим образом:

$$L = \sum_{i=1}^M ((\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \mathbf{a}_1)^2 - \lambda \left(\sum_{j=1}^N a_{1,j}^2 - 1 \right) \rightarrow \max,$$

или

$$L = \sum_{i=1}^M \left(\sum_{j=1}^N (r_{i,j} - r_{0,j}) a_{1,j} \right)^2 - \lambda \left(\sum_{j=1}^N a_{1,j}^2 - 1 \right) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где L – целевая функция для подхода, выбранного в рамках проекта; то есть это функция максимизации дисперсии между векторами проекций выбранных на исходном изображении точек на вектор \mathbf{a}_1 .

Для нахождения решения уравнения (3) приравниваем первые производные L для каждой из компонент первой главной компоненты, где $l = 1 \dots N$, к нулю, тогда в матричном виде получим выражение:

$$C \mathbf{a}_1 = \lambda \mathbf{a}_1, \quad (4)$$

где C – ковариационная матрица.

Таким образом, выражение (3) учитывает требование для локальных окрестностей точек, которые считаются непохожими друг на друга и поэтому в пространстве параметров их векторы признаков максимально удалены друг от друга.

После того как будут найдены первые главные компоненты \mathbf{a} и на их основе будет построено новое признаковое пространство, в рамках предлагаемого подхода следует шаг проецирования ЛО на векторы главных компонент. На этом шаге ЛО перемещаются из пространства исходного изображения томограммы в пространство признаков ЛО, которое должно обеспечить описание исходных ЛО наиболее дискриминантными признаками.

Получаемые проекции далее используются в алгоритме кластеризации. Подробное описание представлено в статье [11]. Результатом операции кластеризации пространства признаков является набор заранее заданного количества центров классов, каждый из которых описывает вокруг себя некоторую область нового пространства (области всех классов не пересекаются).

Информация о центрах сформированных классов и новое пространство признаков используются на шаге собственной сегментации новых изображений томограмм того же исследуемого препарата. При этом важно отметить, что полученные классы и пространство признаков учитывают особенности информационного содержания томограмм исследуемого препарата, что в результате способствует лучшему разделению элементов, составляющих изображение В-скана.

Для того чтобы выполнить сегментацию нового изображения томограммы, необходимо сперва каждую его область \mathbf{r} с размером стороны s , равной размеру области, использованной для разбиения исходного изображения на шаге обучения, спроецировать в новое пространство признаков. Для определения типа каждой области необходимо рассчитать расстояния от полученного для нее вектора проекции до всех сформированных на этапе кластеризации центров классов и после этого выбрать среди всех ближайший класс, до которого будет минимальное расстояние. Определив принадлежность каждой ЛО к определенному классу, можно будет выполнить их автоматическое разделение. При этом каждому классу будет соответствовать определенное текстурное содержание исходной томограммы, то есть область, относящаяся к определенному объекту на изображении (ткань или дефект в ней, различные объекты и фон).

Экспериментальное исследование метода сегментации

В предлагаемом проекте рассматривается задача сегментации двумерных изображений, сформированных средствами оптической когерентной томографии. Такие изображения в общем случае характеризуют внутреннюю слоистую структуру некоторой среды, которая напрямую зависит от состава и свойств этой среды. Предлагается исследовать один из наиболее важных для современной медицины случаев – томограммы биологических тканей и органических материалов, чья структура не является априорно известной с высокой степенью достоверности.

Размер исходного изображения (рис. 1) составил 1 280x500 пикселей. В экспериментах были исследованы различные значения сторон ЛО. В качестве оптимального выбрано значение 12 пикселей, при котором на таких ЛО все еще различимы признаки некоторой текстуры. С другой стороны, размер выбранных ЛО позволяет с достаточной степенью подробности выполнить сегментацию изображения.

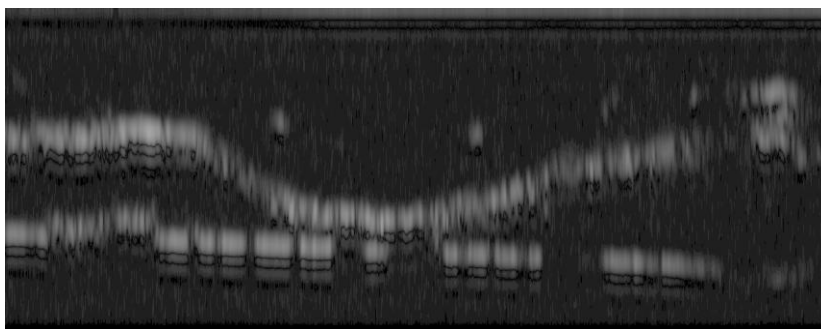


Рис. 1. Исходное изображение томограммы, взятое для обучения алгоритма сегментации на основе признаков представлений ЛО

Для обучения использовалось единственное изображение, на котором было выбрано 12 740 локальных областей. В результате работы метода анализа главных компонент были

сформированы 48 главных компонент (рис. 2), которые послужили базисом для нового пространства признаков. Размер каждой из них 12x12 пикселей.



Рис. 2. Базис нового пространства признаков для описания ЛО изображения томограммы (увеличение в четыре раза)

Следующий шаг обучения алгоритма сегментации заключается в проецировании исходных 12 740 ЛО в новое пространство признаков с целью получения их отображения в виде векторов признаков размерностью 48 элементов. Полученные векторы проекций используются на шаге кластеризации пространства признаков, целью которого является определение областей этого пространства, описывающих близкие по содержанию фрагменты исходного изображения. В результате линейной кластеризации сохраняется информация о центрах сформированных классов, количество которых в экспериментах варьировалось от 4 до 64. Стоит отметить, что в случае использования большого числа классов происходит подробное обнаружение элементов изображения на границе объекта и фона, а также в качестве самостоятельных областей начинают выступать различные выбросы (мелкие детали фона), что сказывается на качестве результатов сегментации. В случае же использования лишь трех классов происходит довольно грубое разделение объекта и фона, что также является неудовлетворительным в некоторых случаях. В качестве оптимального было выбрано значение четырех классов.

Подробная информация о результатах исследования при установке различных комбинаций параметров алгоритма, а также другие примеры изображений указаны в соответствующей главе моей кандидатской диссертации (размеры скользящего окна и обучающей выборки изображений, вариации количества формируемых ЛО, количество используемых компонент нового пространства и классов, формируемых в результате кластеризации).

После этапа обучения алгоритма вся необходимая информация о центрах классов пространства признаков, а также о базисе этого пространства может быть использована на этапе непосредственной сегментации изображений томограмм того же изучаемого препарата биологической ткани. Результат сегментации представлен на рис. 3.

Видно, что на изображении выделилось четыре типа областей, соответствующих различным характеристикам текстуры. Необходимо отметить, что области, соответствующие тканям исследуемого препарата (фон), успешно были отделены от областей, имеющих отличную от фона физическую природу (объект). Данное обстоятельство свидетельствует о пригодности предложенного метода для осуществления операции сегментации томографических изображений.

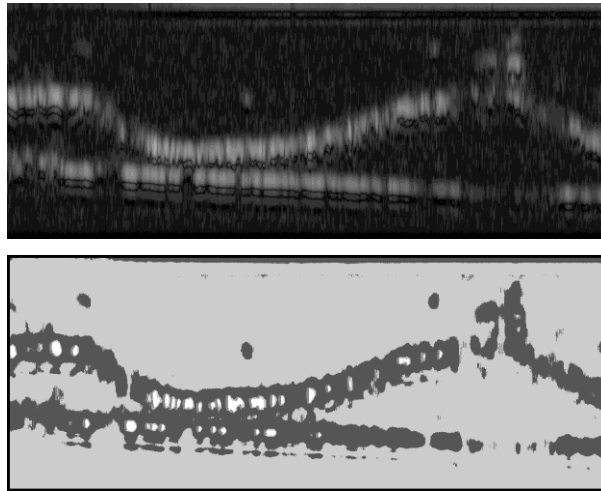


Рис. 3. Результат сегментации томограмм биологической ткани на

Метод построения пространства признаков по набору изображений женских лиц на основе принципов обучения

В настоящее время обнаружение и распознавание человеческих лиц являются популярными задачами. Изображения лиц содержат в себе информацию о возрасте человека и его эмоциональном состоянии. Необходимо выявить различные признаки, которые смогли бы помочь получить эту информацию. Автоматическое извлечение признаков является предпочтительным ввиду большой вариативности задачи анализа лиц. В настоящем проекте будет рассматриваться менее изученная проблема анализа субъективной привлекательности женских лиц.

Существует два способа решения данной проблемы. В первом – для исследования эстетической красоты женщин используется автоматическое измерение характеристик их лиц [12, 13]. Геометрические признаки не обладают достаточной выразительной силой и не инвариантны к углу обзора.

Другой способ решения опирается на использование максимально подробной информации о лице с помощью алгоритмов машинного обучения. В этом случае изображение представляется в виде векторов признаков. Для выявления каких-либо особенностей анализируемых изображений в выбранном пространстве признаков осуществляют поиск особых направлений, которые могли бы более точно описать лица интересующего класса, называемые «собственными лицами».

Наиболее широко распространенный подход к анализу многомерного пространства признаков является метод анализа главных компонент [14]. Основной его недостаток в том, что построенные признаки (собственные лица) линейно зависят от яркостей пикселей и являются не инвариантными к изменениям направления освещения и положению точки наблюдения. Для того чтобы его преодолеть, некоторые авторы используют текстурные признаки [15, 16].

Такие ограниченные представления как геометрические характеристики (пропорции, симметрия и т. п.) не могут быть использованы для многих задач, поэтому в настоящем проекте идея «собственных лиц» обобщается за счет включения дополнительных количественных меток, присваиваемых их изображениям. Подробный аналитический обзор современного состояния данной области компьютерного зрения приведен в статье [10].

Опишем условия рассматриваемой задачи. Имеется набор исходных 115 изображений женских лиц \mathbf{f}_i , которые были взяты из Интернета, в частности из специальной базы изображений FEI Face Database [17] (рис. 4). Изображения имеют размер 40×60 пикселей и представляются в виде некоторых M -компонентных векторов $\mathbf{f} = \{f_1, f_2, \dots, f_M\}$. Исходные признаки – это значения интенсивности пикселей полутоновых изображений, исходя из размера которых, $M = 2400$. Подробная информация о предобработке изображений для подготовки их к использованию изложена в статье [10]. Каждому изображению опрошиваемый человек ставит в соответствие значение привлекательности a_i в диапазоне от 0 до 1000. Полученные значения субъективной привлекательности лица делятся на 1000, что необходимо для функционирования алгоритма.



Рис. 4. Изображения женских лиц из базы изображений

Необходимо построить такое признаковое отображение, которое поможет предсказать значение a для некоторого нового изображения \mathbf{f} . В данном случае мы рассматриваем линейное отображение, таким образом, что каждый признак получается проецированием некоторого изображения \mathbf{f} на некоторое направление \mathbf{w} : $\mathbf{f}\mathbf{w}$ – скаляр в результате произведения двух векторов. Простейший путь обнаружить признак, предсказывающий привлекательность, заключается в максимизации значения корреляции:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{f}_i \mathbf{w} - \mathbf{f}_0 \mathbf{w})(a_i - a_0) \rightarrow \max, \quad (5)$$

где \mathbf{f}_0 – вектор среднего изображения; a_0 – среднее значение a_i .

При максимизации выражения (5) должно быть принято во внимание условие $\|\mathbf{w}\| = 1$.

Тогда целевая функция L может быть представлена следующим образом:

$$L = \mathbf{C} - \lambda \left(\sum_{k=1}^M w_k^2 - 1 \right) \rightarrow \max \Rightarrow w_k \propto \sum_{i=1}^N (f_{i,k} - f_{0,k})(a_i - a_0). \quad (6)$$

Коэффициент корреляции проекций примеров изображений с их значениями привлекательности составляет 0,54. Далее примеры изображений были разделены случайным образом на две независимые части: обучающий и тестовый наборы (35 и 10 изображений соответственно). Новое направление \mathbf{w}_1 было построено с использованием первого набора. Коэффициент корреляции проекций изображений из обучающего набора вырос до 0,6, но для тестового набора он оказался равным 0,05. Это означает, что достаточно высокий коэффициент корреляции по ограниченному обучающему набору не гарантирует хорошего предсказания значения привлекательности. Только один (линейный) признак с наилучшим значением корреляции является достаточным для решения поставленной задачи. Более того, если учитывать остатки $\{\mathbf{f}_i - (\mathbf{w}_1 \mathbf{f}_i) \mathbf{w}_1\}$, они будут декоррелированы со значением $\{a_i\}$ и найти дополнительные признаки становится невозможным.

Для преодоления сложившегося ограничения в рамках проекта было предложено принять во внимание предположение о распределении изображений женских лиц и

соответствующих им оценок в выбранном пространстве признаков. Это является одной из ключевых особенностей предлагаемого подхода. Как уже было отмечено, мы ищем линейное отображение \mathbf{w} исходных цифровых изображений лиц \mathbf{f} в признаковом пространстве для предсказания значения привлекательности a для новых изображений, не входивших в обучающую выборку.

Таким образом, направление \mathbf{w} должно быть максимально различительным для обучающих изображений. Иными словами, установленные конкретным человеком для этих изображений значения привлекательности должны быть пропорциональны значениям проекций этих изображений на искомое направление \mathbf{w} . Это обстоятельство позволяет сделать предположение о том, что вектора признаков изображений обучающей выборки должны располагаться в некоторых определенных местоположениях в пространстве признаков. Таким образом, необходимо выявить наиболее существенное направление \mathbf{w} , основываясь на котором можно будет делать предсказание с определенной степенью точности.

Как известно, любое направление в пространстве может быть задано как вектор с использованием лишь двух точек и указанием их порядка. В данном проекте предполагается, что направление \mathbf{w} должно быть задано лишь на основе исходных M -компонентных векторов \mathbf{f}_i . Число всех возможных комбинаций (парных сочетаний векторов исходных признаков для обучающих изображений) напрямую зависит от размера обучающей выборки, поэтому требуется перебрать их все, чтобы найти наиболее подходящее направление \mathbf{w} .

Для выбора одного из всех возможных направлений \mathbf{w} необходим критерий их качества, отвечающий за способность наилучшим образом описывать особенности исходных данных, то есть изображений женских лиц и выставленных им субъективных оценок привлекательности. В качестве такого критерия был выбран коэффициент корреляции Пирсона (ККП) между проекциями обучающих изображений на текущее направление \mathbf{w} и значениями субъективной привлекательности изображенных женских лиц. Выбрав два вектора признаков из обучающей выборки, для которых ККП исходно равен 1, начинаем пошагово формировать искомое направление \mathbf{w} на базе только лишь тех векторов, добавление которых к выбранной паре будет в минимальной степени изменять значение ККП. Процесс формирования класса продолжается до тех пор, пока ККП не станет ниже установленного порога, равного 0,9.

Подробный алгоритм построения направления \mathbf{w} рассмотрен в статье [10]. Для всех возможных комбинаций пар векторов признаков изображений обучающей выборки формируются различные направления \mathbf{w} , которые затем сравниваются по значению ККП и по количеству элементов, удовлетворяющих данной паре. Среди всех построенных выбирается \mathbf{w} с наибольшим значением ККП и наибольшим количеством векторов в классе. После этого векторы признаков, вошедшие в класс с выбранным \mathbf{w} исключаются из рассмотрения, а для оставшейся обучающей выборки по тому же алгоритму происходит поиск второго направления \mathbf{w} . Далее для оставшихся обучающих изображений вновь ищется наиболее устойчивое направление \mathbf{w} . В данном проекте было решено ограничиться пятью ($N = 5$) уникальными направлениями \mathbf{w} , для 65 тестовых изображений.

Линейные функции предсказания и решающее правило для их выбора

Построенные N направлений \mathbf{w} являются необходимыми, так как содержат важнейшую информацию о субъективном восприятии красоты лиц конкретного человека, но не достаточными для осуществления предсказания значения субъективной привлекательности a новых изображений из тестового набора. Предполагается описать каждый набор векторов

обучающих изображений, сформированный на основе выбора направлений \mathbf{w} при помощи линейной функции вида:

$$\mathbf{a}_t = A\mathbf{x}_t + B, \quad (7)$$

где индекс t изменяется от 0 до N ; A и B – стандартные параметры прямой на плоскости; \mathbf{x}_t – вектор значений проекций изображений обучающей выборки, относящихся к определенному классу t , на выбранное для него значение \mathbf{w}_t .

С помощью метода наименьших квадратов с использованием выражения (7) можно построить N прямых (по одной для каждого \mathbf{w}_t), вычислив уникальные параметры A и B . Построенные прямые дают возможность сделать линейное предсказание значений привлекательности для нового изображения из тестовой выборки. Для этого необходимо вычислить значение проекции \mathbf{x}_t этого изображения на каждое из направлений \mathbf{w}_t (всего N значений). Подставив полученное значение \mathbf{x}_t в уравнение (7) с конкретными параметрами A_t и B_t , можно рассчитать значение a_t . Таким способом получим N предсказаний о привлекательности нового изображения лица, не входившего в обучающую выборку.

Как правило, все N значений сильно различаются между собой, и только одно из них необходимо выбрать как самое достоверное для осуществления правдоподобного предсказания, в наибольшей степени схожего с оценкой, которую дал бы тот человек, который оценивал изображения обучающей выборки. Для осуществления этого в данном проекте предлагается ввести решающее правило, которое является отличительной особенностью предложенного подхода. Суть его заключается в следующем.

Необходимо последовательно добавлять вектор признаков «нового» лица в классы, сформированные на основе выбора направления \mathbf{w}_t в пространстве признаков, при этом необходимо заново рассчитывать значение ККП для текущего класса с учетом добавленного нового объекта. Среди всех N классов, а следовательно, и среди всех функций линейного предсказания необходимо выбрать тот, изменение ККП в котором будет минимальным. На основе выбранной функции линейного предсказания можно осуществить надежное предсказание значения субъективной привлекательности лица из тестовой выборки.

Экспериментальная проверка метода построения признаков женских лиц для предсказания значения их привлекательности

Подробнее методика проведенных экспериментов описана в статье [10]. Было использовано 115 изображений женских лиц, для каждого из которых участник эксперимента выставил субъективную оценку привлекательности. Обучающая выборка была составлена из 65 изображений, выбранных случайным образом. Для построения пространства признаков и поиска в нем особых направлений \mathbf{w} , а также построения функций линейного предсказания были использованы исключительно лишь изображения обучающей выборки. Для изображений тестовой выборки оценки субъективной привлекательности были выставлены только для последующего их сравнения с предсказаниями, обеспеченными предлагаемым подходом.

После того, как на основе изображений обучающего набора были построены соответствующие направления \mathbf{w} , а также линейные решающие функции, все изображения тестового набора были распределены по классам, что позволило установить значения их привлекательности, предсказываемые в программе. На графике (рис. 5) представлены три кривые, отображающие зависимость между значениями субъективной привлекательности от номера изображения тестовой выборки.

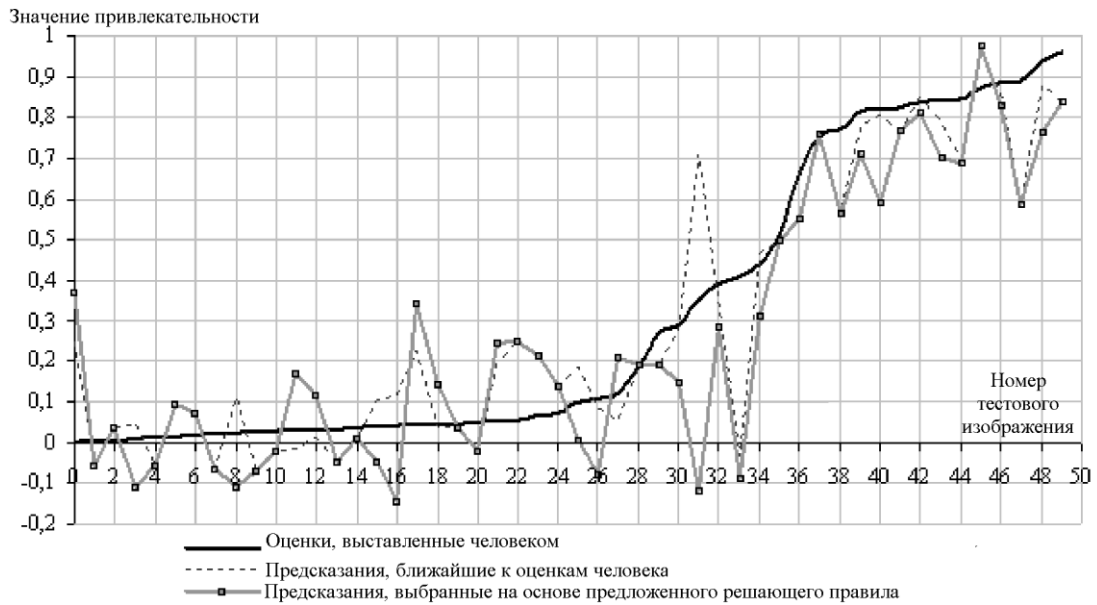


Рис. 5. Значения привлекательности лиц на изображениях, установленные пользователем и предсказанные машиной

Графики демонстрируют отклонения предсказанных предложенным методом значений привлекательности от оценок, выставленных человеком. Разница между предсказанием, сделанным по ближайшему к пользовательской оценке значению, и предсказанием, сделанным на основе решающего правила, не является существенной, что свидетельствует об адекватности установленного критерия.

Коэффициент корреляции Пирсона между значениями, предсказанными по ближайшему расстоянию от пользовательских оценок, и оценками пользователя составил 0,93, тогда как ККП между значениями, предсказанными на основе решающего правила, и оценками пользователя составил 0,89. По сравнению с ранее известными работами, в которых максимальное значение ККП равнялось 0,7, значение 0,89 является многообещающим. Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенный новый подход анализа изображений лиц позволяет предсказывать значения субъективной привлекательности изображений женских лиц с высокой степенью точности.

Стоит отметить, что согласно полученным зависимостям, изображенным на рис. 5, предложенный подход позволяет выполнить разделение обрабатываемых тестовых изображений по уровню 0,4 на две группы: привлекательные и непривлекательные лица для человека, выставившего оценки этим изображениям. Это обстоятельство дает возможность реализовать быструю фильтрацию запрашиваемых пользователем сайта знакомств фотографий женских лиц.

Заключение

В работе рассмотрена и исследована проблема обучения систем признакового представления изображений. Установлено, что современные методы сегментации и распознавания изображений должны адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды.

Разработан новый подход обучения признакового описания локальных областей изображений томограмм биологических препаратов для адаптации алгоритма сегментации к их содержанию. Подход основан на методе анализа главных компонент, благодаря которому

формируется пространство признаков, необходимое для построения проекций исходных ЛО изображения, которые участвуют в процедуре кластеризации данного пространства.

Предложенный подход может быть использован в современных диагностических комплексах телемедицины для автоматической оценки характеристик проб тканей пациентов. При использовании базы данных с экспертными заключениями специалистов такая система может быть полезной для прогнозирования диагноза пациента.

Метод построения признаков изображений женских лиц разработан на основе модифицированного метода анализа главных компонент. Входными параметрами метода являются значения привлекательности, предоставленные определенным человеком согласно его субъективному восприятию красоты. Предложенный подход основан на кластеризации признакового пространства по пороговому значению ККП. Метод позволяет с высокой степенью точности (значение ККП между предсказанием и оценками человека равен 0,89) предсказывать субъективное значение привлекательности для новых женских лиц, которые не были задействованы на этапе обучения. Предложенный подход может быть внедрен в поисковой системе на сайтах знакомств в сети Интернет для осуществления фильтрации анкет кандидатов, индивидуально подстроенной под субъективное восприятие красоты каждого отдельного пользователя.

Публикации

1. Аверкин А.Н. Обучение систем сопоставления изображений путем оптимизации их признаков представлений // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 11. С. 69–79.
2. Potapov A.S., Malyshev I.A., Puysya A.E., Averkin A.N. New paradigm of learnable computer vision algorithms based on the representational MDL principle // Proceedings of SPIE. Defense, security and sensing Symposium, automatic target recognition XX (Conference 7696A). Orlando, Florida, USA, 5–9 April 2010. Vol. 7696. P. 769–606.
3. Аверкин А.Н., Потапов А.С. Метод быстрого сопоставления изображений по гистограммам принадлежности их ключевых точек к множеству классов, сформированных в результате обучения // Труды научно-исследовательского центра фотоники и оптоинформатики: Сб. статей. СПб., 2010. Вып. 2. С. 279–289.
4. Аверкин А.Н., Потапов А.С. Программный модуль «Инкрементное обучение параметризованных алгоритмов описания изображений» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2011610633). М., 2011.
5. Аверкин А.Н. Улучшенный метод быстрого сопоставления изображений по гистограммам дескрипторов ключевых точек // Список трудов I конференции молодых ученых и специалистов «Будущее оптики – 2012». СПб., 2012. С. 68–71.
6. Averkin A.N., Potapov A.S. Learning representative features for facial images based on a modified principal component analysis // Proc. OSAV'12. American Institute of physics series (in press).

Литература

1. Piater J. H., Grupen R. A. Distinctive features should be learned // Proc. IEEE Intern. Workshop on biologically motivated computer vision (Seoul, Korea, May 2009). Series Title Lecture Notes in Computer Science. 2000. Vol. 1811. P. 52–61.
2. Sziebig G., Solvang B., Korondi P. Image processing for next-generation robots // Computer vision. In tech. 2008. P. 429–440.

3. Rother C., Minka T., Blake A., Kolmogorov V. Cosegmentation of image pairs by histogram matching incorporating a global constraint into MRFs // In Proc. of Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC, USA. 2006. P. 993–1000.
4. Holtzman-Gazit M., Kimmel R., Peled N., Goldsher D. Segmentation of thin structures in volumetric medical images // IEEE transactions on medical imaging. 2006. Vol. 15. № 2. P. 354–363.
5. Yushkevich P.A., Piven J., Hazlett H.C., Smith R.G., Ho S., Gee J.C., Gerig G. User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: Significantly improved efficiency and reliability // NeuroImage. 2006. Vol. 31. № 3. P. 1116–1128.
6. Winder S. A. J., Brown M. Learning local image descriptors // IEEE conference on computer vision and pattern recognition. CVPR. 2007. P. 1–8.
7. Jahrer M., Grabner M., Bischof H. Learned local descriptors for recognition and matching // Proc. of computer vision winter workshop. 2008. P. 39–46.
8. Mikolajczyk K., Schmid C. A performance evaluation of local descriptors // IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence. 2005. Vol. 27. № 10. P. 1615–1630.
9. Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International journal of computer vision. 2004. Vol. 60. № 2. P. 91–110.
10. Aверкин А.Н., Потапов А.С. Learning representative features for facial images based on a modified principal component analysis // Proc. OSAV'12. American Institute of physics series (in press).
11. Аверкин А.Н., Потапов А.С. Метод быстрого сопоставления изображений по гистограммам принадлежности их ключевых точек к множеству классов, сформированных в результате обучения // Труды научно-исследовательского центра фотоники и оптоинформатики: Сб. статей. СПб., 2010. Вып. 2. С. 279–289.
12. Zimble M. S., Ham J. Aesthetic facial analysis // Cummings Otolaryngology: Head and Neck Surgery. New York, 2005. P. 1–5.
13. Zhang D., Zhao Q., Chen F. Quantitative analysis of human facial beauty using geometric features // Pattern recognition. 2011. Vol. 44. № 4. P. 940–950.
14. Eisenthal Y., Dror G., Ruppin E. Facial attractiveness: Beauty and the machine // Neural computation. 2006. Vol. 18. № 1. P. 119–142.
15. Gray D., Yu K., Xu W., Gong Y. Predicting facial beauty without landmarks // Proceedings of the 11th European Conference on computer vision. 2010. P. 434–447.
16. Whitehill J., Movellan J. R. Personalized facial attractiveness prediction // Automatic face & gesture recognition. 2008. P. 1–7.
17. FEI Face Database by the Artificial Intelligence Laboratory of FEI in São Bernardo do Campo, São Paulo, Brazil. 2005 (<http://fei.edu.br/~cet/facedatabase.html>).



Бардов Владимир Михайлович
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: Vladimir.Bardov@gmail.com

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПО ПОКАЗАНИЯМ ДАТЧИКОВ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

В.М. Бардов

Научный руководитель – профессор А.А. Бобцов

Введение

Согласно отчету Всемирной организации здравоохранения [1] в 2009 г., в 49 странах Европы в результате ДТП 120 тыс. человек погибли и 2,4 млн. получили травмы различной степени сложности. Особенно остро проблема дорожно-транспортного травматизма стоит в возрастной группе людей от 5 до 29 лет, для которых аварии – главная причина смерти.

Системы пассивной безопасности (подушки, ремни и т. д.) предназначены для защиты во время аварии, но не для ее предотвращения. Активные системы безопасности (антипробуксовочная система, электронная блокировка дифференциала и т. д.) позволяют в различных критических ситуациях сохранять контроль над автомобилем. Все эти средства действуют в рамках одного автомобиля и не учитывают поведение других участников дорожного движения.

В настоящее время в России насчитывается более 30 млн легковых автомобилей, и для больших городов, таких как Санкт-Петербург, не менее важной проблемой является проблема перегруженности транспортной сети. По статистическим данным, в 2009 г. в США вследствие пробок и заторов на дорогах, перерасход топлива составил 14,88 млрд литров – это около 115 млрд долларов [2].

Одним из возможных путей решения данной проблемы является разработка и внедрение систем мониторинга транспортной сети [3, 4, 5, 6] для определения параметров как потока, так и отдельных транспортных средств: класса, скорости, курсового угла, колесной базы, бокового положения, нагрузки на оси.

Данный подход предполагает создание интеллектуальной дорожной инфраструктуры, представленной сенсорными узлами, расположенными на дорожной поверхности [7, 8, 9].

Идея заключается в том, что каждый чувствительный узел предоставляет информацию о текущей ситуации на отдельном участке дороги. Проанализировав эти данные можно перераспределять нагрузку на другие участки дороги, тем самым обеспечивая равномерную загруженность транспортной сети. Знание параметров отдельного автомобиля необходимо для выработки рекомендаций с целью предотвращения дорожно-транспортных происшествий. Например, в случае обгона с выездом на полосу встречного движения, система заранее сообщит о наличии помехи, препятствующей совершению данного маневра.

Целью данной работы является синтез алгоритма оценки скорости транспортного средства с использованием одного магнитометра, расположенного на дорожной поверхности. Данный параметр играет важную роль при определении общей картины дорожной ситуации и необходим как для предотвращения ДТП, так и для снижения загруженности транспортной сети.

В работе предлагается использовать следующие методы исследования: скользящего среднего (moving average), среднего значения (Average-Bar), математического моделирования, быстрое преобразование Фурье, вейвлет-анализ с использованием функции Добеши и др.

Достигнутые результаты

При решении задачи мониторинга транспортной сети основным является метод совместной инфраструктуры (cooperative infrastructure) [3, 4, 5, 6], который предполагает создание интеллектуальной дорожной инфраструктуры, представленной сетью чувствительных узлов (набор датчиков), расположенных на дорожной разметке [7, 8, 9]. Идея заключается в том, что каждый чувствительный узел предоставляет информацию о текущей ситуации на отдельном участке дороги. Рассмотрим существующие методы оценки скорости транспортного средства.

Алгоритм измерения скорости с использованием индуктивного петлевого датчика позволяет получать оценки с точностью до 90 % [10], но имеет значительный недостаток – его необходимо вмонтировать непосредственно в дорожное полотно по всей его поверхности, при этом, помимо значительных затрат на установку, на время дорожных работ движение полностью парализуется.

Оценка скорости с использованием пневматических трубок [11] осуществляется путем измерения времени проезда автомобиля от одного датчика к другому. При этом на трубки оказывается значительное физическое воздействие, и уже через несколько недель работы оборудование необходимо полностью заменять.

Видеоборудование [12, 13] и радары [13] требуют значительных вычислительных мощностей, и их стоимость значительно выше рассматриваемых аналогов.

В статьях [3, 13, 14, 15] описывается метод оценки скорости за счет измерения времени проезда автомобиля от одного магнитометра до другого. Данный способ требует идеальной синхронизации, чего на практике добиться практически невозможно [3].

В работе [16] предлагается использовать лишь один магнетометр. В этом случае оценка скорости производится путем деления среднестатистического магнитного пути на время проезда транспортного средства мимо датчика. Очевидно, что такой способ не учитывает индивидуальных параметров автомобиля и обладает существенной погрешностью.

В статье [17] рассматривается метод оценки скорости путем сравнения показаний двух магнетометров, расположенных по разные стороны дороги напротив друг друга. Предлагаемый подход позволяет независимо от траектории движения довольно точно оценивать скорость, но только небольших транспортных средств.

В данной работе оценку скорости предлагается проводить с использованием только одного магнитометра, измеряющего изменение магнитного поля. Рассмотрим модель магнитного поля.

Электромагнитное поле описывается уравнениями Максвелла [3]:

1. Закон Гаусса:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho ; \quad (1)$$

2. Закон Гаусса для магнитного поля:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 ; \quad (2)$$

3. Закон индукции Фарадея:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} ; \quad (3)$$

4. Закон Ампера – Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (4)$$

где \mathbf{D} – электрическая индукция, ρ – плотность стороннего электрического заряда, \mathbf{B} – магнитная индукция, \mathbf{E} – напряженность электрического поля, \mathbf{H} – напряженность магнитного поля и \mathbf{J} – плотность электрического тока, ∇ – дифференциальный оператор набла.

Чтобы получить полную систему уравнений электродинамики, к системе уравнений Максвелла необходимо добавить материальные уравнения, в которых учтены индивидуальные свойства среды:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = (1 + \chi_e) \varepsilon_0 \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = (1 + \chi_m) \mu_0 \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (6)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, \bar{P} – поляризация, χ_e – диэлектрическая восприимчивость, ε – относительная диэлектрическая проницаемость, μ_0 – магнитная постоянная, χ_m – магнитная восприимчивость, μ_r – относительная магнитная проницаемость.

При прохождении транспортного средства вдоль датчика изменяется магнитная и электрическая проницаемости среды, а значит, изменяется и магнитное поле. Предположим, что магнитное поле меняется медленно, тогда уравнения Максвелла можно сократить до уравнений магнитостатики [3]:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{J}. \quad (8)$$

Векторный потенциал магнитного диполя [3] можно записать как:

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{r}) = \frac{\mu_0 \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{r}}{4\pi |\mathbf{r}|^3}, \quad (9)$$

где $\bar{\mu}$ – магнитный момент и \bar{r} – вектор, проведенный из начала координатной системы, связанной с датчиком, к вектору магнитного момента.

Уравнение (9) связывается с магнитной индукцией следующим соотношением:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (10)$$

Поле магнитного диполя может быть записано в векторной форме [3]:

$$\mathbf{B}(\boldsymbol{\mu}_i, \mathbf{r}_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3(\boldsymbol{\mu}_i \cdot \mathbf{r}_i) \mathbf{r}_i - \boldsymbol{\mu}_i |\mathbf{r}_i|^2}{|\mathbf{r}_i|^5}, \quad \mathbf{r}_i, \boldsymbol{\mu}_i \in \square^3. \quad (11)$$

В статье [18] показано, что транспортное средство можно представить в виде n объектов, обладающих n индивидуальными магнитными моментами (рис. 1). В свою очередь в соответствии с принципом суперпозиции n индивидуальных магнитных моментов можно представить результирующим магнитным моментом ($\boldsymbol{\mu}_{total}$), магнитное поле которого равно [3, 18]:

$$\mathbf{B}(\boldsymbol{\mu}_i, \mathbf{r}_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{3(\boldsymbol{\mu}_i \cdot \mathbf{r}_i) \mathbf{r}_i - \boldsymbol{\mu}_i |\mathbf{r}_i|^2}{|\mathbf{r}_i|^5}. \quad (12)$$

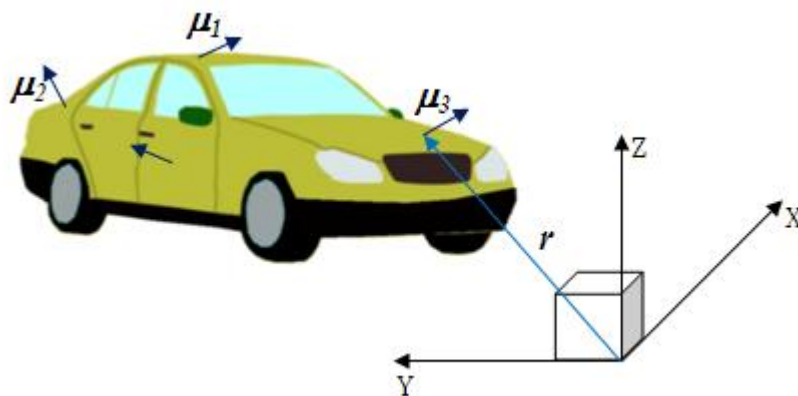


Рис. 1. Магнитные моменты автомобиля (показаны только несколько)

Очевидно, что результирующий магнитный момент зависит от конструктивных особенностей автомобиля (форма кузова, материалы и т. д.), а это значит, что для автомобилей одинаковой конструкции можно говорить о равенстве векторов результирующих магнитных моментов $\bar{\mu}_{total}$.

Предположим теперь, что автомобили одного класса (с одинаковыми векторами результирующих магнитных моментов $\bar{\mu}_{total}$) движутся по одной линии относительно датчика с одинаковыми скоростями V (то есть $\bar{r}(t)$ для данных транспортных средств равны) и проходят расстояние S за t секунд. В таком случае, согласно выражению (12), результаты измерений проекций B_x и B_y будут равны, а также будут равны и углы α , рассчитанные по формуле:

$$\alpha(t) = \arctan\left(\frac{B_x(t)}{B_y(t)}\right). \quad (13)$$

Обозначив за t_{-40} время, при котором $\alpha(t) = -40^\circ$, а за t_{+40} время, при котором $\alpha(t) = +40^\circ$, временной интервал между ними (рис. 2) найдем по формуле:

$$t_M = t_{+40} - t_{-40}. \quad (14)$$

Тогда путь (назовем его магнитным путем S_M), пройденный автомобилем за время t_M , можно найти по формуле:

$$S_M = (t_{+40} - t_{-40}) \cdot V = t_M \cdot V, \quad (15)$$

где V – скорость автомобиля.

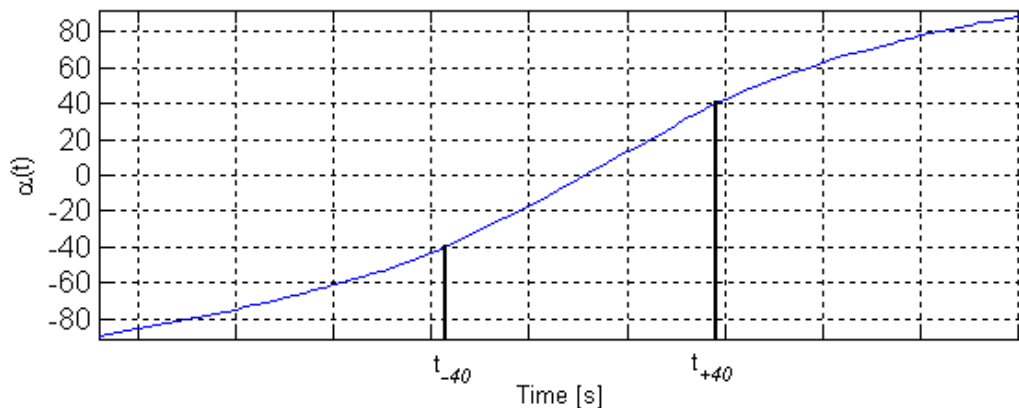


Рис. 2. Магнитный путь автомобиля

Предположим теперь, что все исследуемые нами автомобили движутся по прямой линии перпендикулярной (или параллельной) осям датчика, тогда магнитный путь S_M , согласно формулам (12, 15), зависит от:

- скорости V транспортного средства;
- расстояния от траектории движения до датчика, так как при изменении его изменится и $\bar{r}(t)$;
- класса транспортного средства, так как от него будет зависеть и $\bar{\mu}_{total}$.

Допустим расстояние от траектории движения до датчика постоянное для всех исследуемых транспортных средств, то есть ограничившись оценкой скорости автомобилей, движущихся только по ближней к датчику полосе, для транспортных средств одного класса получим одинаковое значение магнитного пути S_M :

$$S_M = t_{M1} \cdot V_1 = t_{M2} \cdot V_2 = \dots = t_{Mn} \cdot V_n. \quad (16)$$

где n – количество исследуемых автомобилей одного класса.

Создав экспериментальным путем базу данных, в которой для каждого класса записаны эталонные значения t_{M-E} для известной скорости V_E , неизвестную нам скорость найдем по формуле, вытекающей из уравнения (16):

$$V = \frac{t_{M-E} \cdot V_E}{t_M}. \quad (17)$$

где t_M – время, за которое исследуемый автомобиль проезжает магнитный путь S_M .

Для определения скорости автомобиля по формуле (17) необходимо знать его класс. Причем согласно данным Федерального управления автомобильных дорог США (FHWA) автомобили классифицируются по количеству осей и расстоянию между ними. Нам же необходимо их классифицировать по магнитным свойствам, то есть по магнитному пути на фиксированной скорости, например при $V_E = 30$ км/ч.

Для классификации транспортных средств используем метод среднего значения (англ. – Average Bar) [14]. Данный метод предполагает классифицировать транспортные средства по их «подписям» – измерениям проекций B_x , B_y и B_z .

В соответствии с методом [14] измерения магнитометра в промежутке времени въезда и выезда автомобиля в зону чувствительности датчика (от t_A до t_D соответственно) по каждой оси разделяются на 20 окон, для каждого из которых находится среднее значение (рис. 3). Далее они нормируются в пределах $[-1, 1]$ (рис. 4).

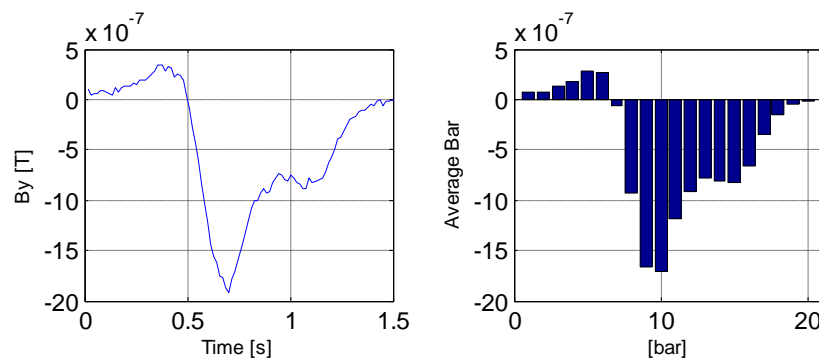


Рис. 3. Нахождение среднего значения измерений по оси Y для пассажирского автомобиля с прицепом на скорости 50 км/ч

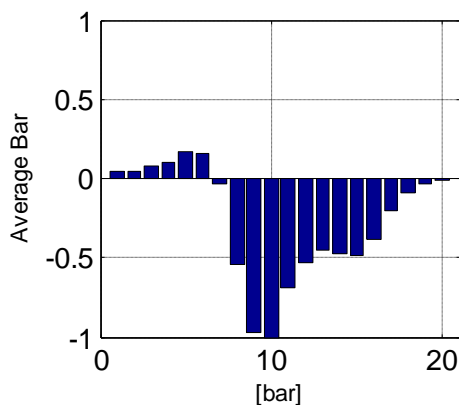


Рис. 4. Нормированное среднее значение

Нормированные значения $x_{measured}$ сравниваются с эталонными значениями x_{etalon} , записанными в базе (рис. 5). Для этого вычисляется Евклидово отклонение по всем трем осям для каждого из 20 окон:

$$Ed = \sqrt{\sum_{i=1}^{60} (x_{etalon} - x_{measured})^2} \quad (18)$$

Класс, соответствующая строка которого в базе имеет наименьшее Евклидово отклонение от измеренных данных, и принадлежит исследуемому автомобилю.

№ Класса	Нормированные значения подписи				V_E	S_{M_E}	t_{M_E}
1	$x_{etalon_1,1}$	$x_{etalon_1,2}$	...	$x_{etalon_1,60}$	V_{E_1}	$S_{M_E_1}$	$t_{M_E_1}$
2	$x_{etalon_2,1}$	$x_{etalon_2,2}$	...	$x_{etalon_2,60}$	V_{E_2}	$S_{M_E_2}$	$t_{M_E_2}$
...
n	$x_{etalon_n,1}$	$x_{etalon_n,2}$	...	$x_{etalon_n,60}$	V_{E_n}	$S_{M_E_n}$	$t_{M_E_n}$

Рис. 5. Структура базы данных

Для снижения потребляемых вычислительных мощностей (это особенно актуально при использовании микроконтроллера) можно использовать метод сжатия данных [19] и вместо 60 точек $x_{measured}$ и x_{etalon} работать только с пятью [14]. Однако такое сокращение может привести к росту ошибок при классификации автомобиля.

В соответствии с описанным выше методом оценка скорости проводится по следующему плану:

- методом среднего значения сравниваются данные, полученные в результате измерений, и данные, хранящиеся в базе, и определяется класс транспортного средства;
- по формулам (2), (3) рассчитываются значения функции $\alpha(t)$ и находится t_M ;
- по формуле (6) находится скорость исследуемого автомобиля (при известном t_{M_E} и V_E для данного класса).

Для автоматизированного определения скорости в приложении MATLAB была написана соответствующая программа.

В результате выполнения данной работы был синтезирован алгоритм оценки скорости транспортного средства с использованием одного магнитометра, вмонтированного в дорожное

покрытие. Такой подход обладает рядом преимуществ: отсутствует проблема синхронизации данных; стоимость сенсорного узла гораздо ниже рассматриваемых аналогов; для установки не требуется значительных дорожных работ. Эксперименты, проведенные на реальной дороге, подтвердили работоспособность метода. Точность оценки составила более 90 %.

Область применения

Результаты исследований могут быть использованы на практике в системах мониторинга транспортных сетей для определения скорости транспортного средства, которая играет важную роль при предотвращении ДТП и при анализе текущей дорожной обстановки с целью перераспределения нагрузки на свободные участки дороги.

Так, проблема загруженности транспортной сети может быть решена путем синтеза алгоритма переключения светофоров для перераспределения потока.

На одном из собраний Всемирной организации здравоохранения отмечалось, что причиной ДТП чаще всего являются стандартные ошибки водителей, например выезд на полосу встречного движения. Зная параметры транспортных средств, можно путем выработки рекомендаций для водителей избежать таких ДТП.

Публикации

1. Бардов В.М., Обертов Д.Е. Алгоритм идентификации классов транспортных средств с помощью акселерометров // Информационно-управляющие системы. СПб., 2012 (в печати).
2. Бардов В.М., Обертов Д.Е. Оценивание скорости транспортных средств с использованием магнитометра // Информационно-управляющие системы. СПб., 2012 (отправлено на рецензию).

Конференции

1. Бардов В.М., Обертов Д.Е. Определение параметров транспортного средства с использованием датчиков дорожного покрытия // Материалы конференции. I Всероссийский конгресс молодых ученых (СПб., 2012).

Литература

1. Global status report on road safety – Time for action, World Health Organization (WHO), 2009. 287 p.
2. Schrank D., Lomax T., Turner S. 2010 Urban mobility report // The Texas A&M University System. 2010. 101 p.
3. Isaksson M. Vehicle detection using anisotropic magnetoresistors: Master's thesis. Chalmers University of Technology, 2008.
4. Sullivan J. M., Winker C. B., Hagan M. R. Smart barrel for an adaptive queue-warning systems: Technical report. University of Michigan (February 2005). 118 p.
5. Misener J., Shladover S. PATH investigation in vehicle-roadside cooperation and safety: A foundation for safety and vehicle-infrastructure integration research // Intelligent transportation systems Conference (ITSC'06). IEEE. 2006. P. 9–16.
6. Coleri S., Cheung S. Y., Varaiya P. Sensor networks for monitoring traffic // Communication, control, and computing (42th Annual Allerton Conference). 2004. Vol. 2. P. 883–893.
7. Hostettler R., Birk W., Nordenvaan M. L. Feasibility of road vibration-based vehicle property sensing // Intelligent transport systems (IET). 2010. Vol. 4. P. 356–364.

8. Birk W., Eliasson J., Lindgren P., Osipov E., Riliskis L. Road surface networks technology enablers for enhanced ITS // IEEE VNC 2010 Conference proceeding. 2010. P. 152–159.
9. Hostettler R. Traffic counting using measurements of road surface vibrations: Master's thesis. Lulea University of Technology, 2009.
10. Oh S., Ritchie S. G., Oh C. Real time traffic measurement from single loop inductive signatures // 81st Annual Meeting of the transportation research board (Washington D. C., January 2002). 2002. P. 98–106.
11. Macay M. Benavente, Hancock K., Robuste F. Road safety review: Methodology and implementation on six roadways in the town of Natick, Massachusetts: Minor thesis. Polytechnic University of Catalonia, 2003.
12. Gholam ali rezai rad, Javad mohamadi. Vehicle speed estimation based on the image // 4th International Conference: Sciences of electronic technologies of information and telecommunications. 2007.
13. Cheung S. Y., Varaiya P. Traffic surveillance by wireless sensor networks: Final report // California PATH Research Report. 2007. 161 p.
14. Cheung S. Y., Ergen S. C., Varaiya P. Traffic surveillance with wireless magnetic sensors // Proceedings of the 12th ITS World Congress. 2005. Vol. 1917. P. 173–181.
15. Chan C. Y. Magnetic sensing as a position reference system for ground vehicle control // IEEE transactions on instrumentation and measurement. 2002. Vol. 51. P. 43–52.
16. Cheung S. Y. et al. Traffic measurement and vehicle classification with a single magnetic sensor // Proceedings of the Annual Meeting of the transportation research board. 2005. Vol. 1. P. 173–181.
17. Wahlstrom N. Target tracking using Maxwell's equations: Master's thesis. Linköping University, 2010.
18. Johansson C., Jonasson C., Erlandsson M. Magnetic sensors for traffic detection: Technical report // IMEGO. Sweden, 2006.
19. Chen C. S., Huo K. S. Karhunen-loeve method for data compression and speech synreport // IEEE Proceedings-I. 1991. Vol. 138. № 5. P. 377–380.



Вареников Денис Анатольевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: vardenis@inbox.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ХРАНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Д.А. Вареников

Научный руководитель – И.А. Попова,
начальник департамента информационных технологий

Введение

Активно развивающаяся в нашем вузе система информационной поддержки проектной деятельности (СППД) НИУ ИТМО представляет собой комплекс подсистем, которые, решая поставленные перед ними задачи, образуют целостную картину научной и проектной деятельности университета.

СППД университета объединяет два одинаково важных подхода к организации проектной деятельности в вузе – централизованный и распределенный.

Организация централизованного подхода обеспечивает однозначность данных, возможность получения корректной сводной информации. Разработка и реализация деловых и информационно-программных решений ведения сведений о проектах и результатах научно-практической деятельности (РНПД) различными субъектами и объектами, позволяют отслеживать «жизнь» проекта в различных сферах деятельности университета [1].

Целью работы является разработка информационных и технологических решений системы централизованного хранения результатов научно-практической деятельности.

Работа предполагает решение следующих задач:

- обзор имеющихся в университете источников поступления сведений о РНПД;
- разработка единых подходов для централизованного хранения РНПД;
- разработка методов анализа данных, в том числе исключения дублирования информации;
- организация процессов взаимодействия с различными подразделениями университета, отвечающими за сведения о РНПД.

Источники поступления результатов научно-практической деятельности

Определение источников поступления сведений о проектах и РНПД в университете и предоставление возможности ведения данной информации различным группам (целевой аудитории) позволяют говорить о создании распределенной системы информационной поддержки проектной деятельности [2].

К результатам РНПД относятся:

- публикации – статьи, тезисы, монографии;
- участие / проведение мероприятий – конференции, выставки;
- результаты интеллектуальной деятельности – изобретения, ноу-хау, полезные

модели, промышленные образцы, программы для ЭВМ, награды и пр.

Сложность решения задачи централизованного хранения РНПД связана с наличием многочисленных источников поступления данных, множеством центров учета и информационных систем, где данные вводятся и публикуются.

Научно-практическую и проектную деятельность ведут студенты, аспиранты, преподаватели, сотрудники, творческие коллективы, подразделения, в том числе кафедры и собственно университет. Проектная деятельность выполняется в рамках бюджетного и целевого финансирования, хозяйственных договоров, НИР и НИОКР. Эти же участники проектной деятельности должны формировать отчеты о РНПД. Информация о публикациях преподавателей, студентов и других участников научно-практической деятельности, с которой отчитываются они сами, может быть включена и в результаты проектной деятельности кафедры, проекта и т. д.

Источники поступления данных о РНПД можно разделить на три категории:

- персоны (студенты, преподаватели и сотрудники), ведущие портфолио, где РНПД вводятся в достаточно свободной форме. При этом возможно дублирование информации;
- интернет-портал университета, где размещается информация о мероприятиях, прошедших и планируемых;
- административные структуры (НИЧ, кафедры), которые должны формировать отчеты по результатам проектной деятельности для руководства вуза и внешних структур на базе достоверной, выверенной, исключая дублирование информации.

Для обеспечения совместного функционирования систем, реализующих свободный и регламентированный формат ввода результатов проектной деятельности в СППД, разрабатываются информационно-программные решения межсистемной синхронизации данных. Для СППД системы со свободным форматом ввода (СФВ) служат источником данных о мероприятиях, публикациях и пр. В свою очередь СППД является для них источником выверенной информации о результатах научно-практической деятельности (рис. 1).



Рис. 1. Взаимодействие систем (* – внешние системы)

Подходы к анализу данных

Технология организации межсистемной синхронизации данных о РНПД предполагает три этапа.

На первом этапе выполняется анализ данных, хранящихся в системе СФВ, дублированные данные выделяются и группируются. Технология их анализа предполагает информирование аналитика (пользователя системы) о процентном совпадении данных и формирование рекомендаций о необходимости их группировки.

Второй этап – это создание информационных связей между данными СППД и данными системы СФВ. Аналитик, выбирая одну из систем СФВ, формирует картину информационных связей между ней и СППД. В случае наличия в выбранной системе СФВ данных, отсутствующих в СППД, аналитику предоставляется возможность эти данные добавить. Как и на первом этапе, аналитика информируют о процентном совпадении тех или иных данных и выдают рекомендации о создании связей между ними.

На третьем этапе происходит обеспечение доступа к открытым данным СППД, которые она в заданном формате предоставляет для систем СФВ. Системы СФВ могут либо ссылаться на данные СППД, либо создавать у себя запись со ссылкой на нее.

Большой объем информации, с одной стороны, позволяет провести более точные расчеты и анализ, с другой – превращает поиск решений в сложную задачу [3]. Для выявления дубликатов в системе СФВ использовалось расстояние Левенштейна, или расстояние редактирования.

Система централизованного хранения результатов научно-практической деятельности

В работе представлены информационно-программные решения централизованного хранения результатов научно-практической деятельности (далее подсистема «Централизованное хранение РНПД»).

Перечень базовых функциональных возможностей системы включает:

- администрирование, которое позволяет вводить, редактировать и просматривать системы, используемые для централизованного хранения РНПД;
- предварительный (автоматический) анализ систем СФВ, объединение и формирование групп результатов и вывод статистики;
- организацию взаимосвязи СППД и системы СФВ:
 - предварительный анализ СППД и выбранной системы СФВ;
 - объединение результатов (групп результатов) системы СФВ и СППД;
 - занесение новых результатов в СППД на основе данных систем СФВ;
 - обеспечение межсистемной синхронизации данных;
 - вывод статистики.

Анализ систем СФВ

На рис. 2 представлен общий вид раздела «Анализ внешних систем». Под внешними системами понимается комплекс, состоящий из: системы СФВ, информационной системы, библиотеки, интернет портала университета и пр.

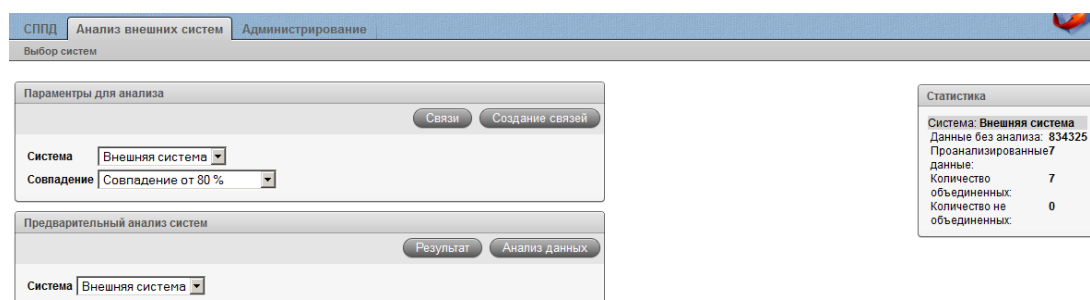


Рис. 2. Общий вид раздела «Анализ внешних систем»

Для удобства работы аналитика в системе предусмотрено окно «Статистика» (рис. 3). В нем приведена основная информация по анализируемым системам. Если в поле «Данные без

анализа» стоит значение «0», это означает, что нет предварительно проанализированных данных или все они уже проанализированы.

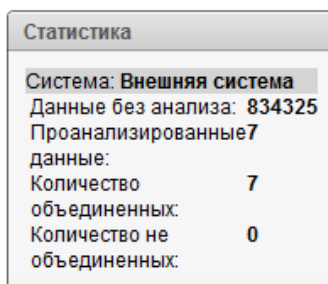


Рис. 3. Раздел «Анализ внешних систем», окно «Статистика»

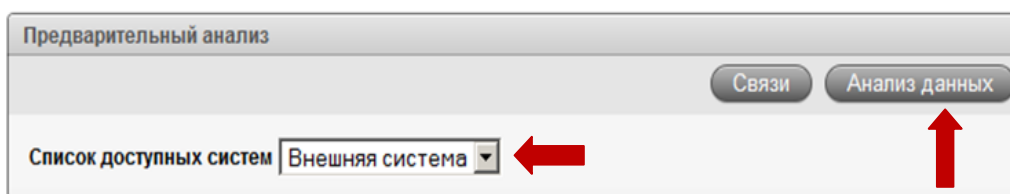


Рис. 4. Раздел «Анализ внешних систем», окно «Предварительный анализ»

Для предварительного анализа данных системой в окне «Предварительный анализ» необходимо выбрать одну из систем и нажать кнопку «Анализ данных» (рис. 4). Этот процесс может занять некоторое время. После его окончания пользователь может перейти к этапу объединения и формирования групп (рис. 5). Для чего он выбирает систему, которую собирается анализировать и значения параметров совпадения (рис. 6). Наиболее вероятным совпадениям анализируемых данных соответствует значение параметра в 80 % и более, далее идут совпадения от 30 до 80 %, до 30 % и затем все остальные.

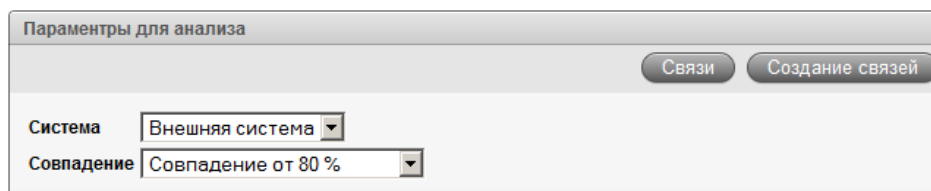


Рис. 5. Раздел «Анализ внешних систем», окно «Параметры для анализа»

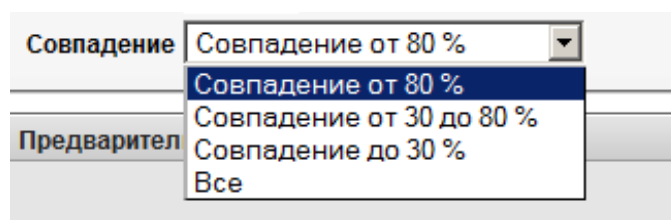


Рис. 6. Параметры совпадения

После нажатия кнопки «Анализ данных» система выведет результаты анализа системы с выбранными параметрами совпадения (рис. 7).

СППД Анализ внешних систем Администрирование		
Выбор систем > Анализ выбранных систем		
<input type="text"/> <input type="button" value="Выполнить"/> <input type="button" value="Действия"/>		
Наименование 1	Наименование 2	Совпадение %
<input checked="" type="checkbox"/> Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2011)	93
<input checked="" type="checkbox"/> Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2011)	93
<input checked="" type="checkbox"/> Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2011)	93
<input checked="" type="checkbox"/> Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2011)	93
<input checked="" type="checkbox"/> Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2011)	93
<input checked="" type="checkbox"/> Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2011)	93
<input checked="" type="checkbox"/> VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	VI Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	98
<input checked="" type="checkbox"/> VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	V Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	96
<input checked="" type="checkbox"/> VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	VI Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	98
<input checked="" type="checkbox"/> VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	V Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	96
<input checked="" type="checkbox"/> VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	VI Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	98
<input checked="" type="checkbox"/> VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	V Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	95
<input checked="" type="checkbox"/> VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	V Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	96
<input checked="" type="checkbox"/> VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	100

Рис. 7. Результат предварительного анализа

Для создания связи между результатами научно-практической деятельности пользователю необходимо нажать на кнопку «Редактирование» (рис. 8) и система подробно продемонстрирует выбранные пользователем результаты (рис. 9).

Наименование 1		
<input checked="" type="checkbox"/>	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии (Информационные технолоп
<input checked="" type="checkbox"/>	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии (Информационные технолоп
<input checked="" type="checkbox"/>	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии (Информационные технолоп
<input checked="" type="checkbox"/>	Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе (Информационные технологии 2010)	Информационные технологии (Информационные технолоп

Рис. 8. Кнопки для создания связи между выбранными РНПД

СППД Анализ внешних систем Администрирование																								
Выбор систем > Анализ выбранных систем > Создание связи																								
<div style="text-align: right;"> <input type="button" value="Отмена"/> <input type="button" value="Создание связи"/> </div>																								
Выбранные мероприятия																								
Действие: <input type="text" value="Не объединять"/>																								
Мероприятие 1																								
Наименование		ГОУ ВПО «СПб ГУ ИТМО»																						
Место проведения		VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых																						
Статус мероприятия		Федеральный																						
Дата начала		20.04.2010																						
Дата окончания		23.04.2010																						
Мероприятие 2																								
Наименование		Федеральный																						
Место проведения		VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых																						
Статус мероприятия		Санкт-Петербург																						
Дата начала		20.04.2010																						
Дата окончания		23.04.2010																						
Сопутствующие связи																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Наименование</th> <th>Место проведения</th> <th>Статус</th> <th>Дата начала</th> <th>Дата окончания</th> <th>Результат</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых</td> <td>-</td> <td>Федеральный</td> <td>20.04.2010</td> <td>23.04.2010</td> <td>Объединенная</td> </tr> <tr> <td>VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых</td> <td>СПб ГУ ИТМО, Санкт-Петербург</td> <td>Региональный</td> <td>20.04.2010</td> <td>23.04.2010</td> <td>Объединенная</td> </tr> </tbody> </table>							Наименование	Место проведения	Статус	Дата начала	Дата окончания	Результат	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	-	Федеральный	20.04.2010	23.04.2010	Объединенная	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	СПб ГУ ИТМО, Санкт-Петербург	Региональный	20.04.2010	23.04.2010	Объединенная
Наименование	Место проведения	Статус	Дата начала	Дата окончания	Результат																			
VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	-	Федеральный	20.04.2010	23.04.2010	Объединенная																			
VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	СПб ГУ ИТМО, Санкт-Петербург	Региональный	20.04.2010	23.04.2010	Объединенная																			
1 - 2																								

Рис. 9. Общий вид подраздела «Создание связи»

На рис. 9 представлены два окна «Выбранные мероприятия» и «Сопутствующие связи». В первом из них показаны выбранные пользователем РНПД и их характеристики. Поле «Действие» (рис. 10) предназначено для выбора пользователем действия, которое необходимо применить к данным мероприятиям.

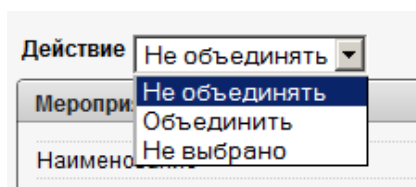


Рис. 10. Окно «Выбранные мероприятия», поле «Действие»

В окне «Сопутствующие связи» (рис. 9) обозначены уже существующие связи СППД с выбранными мероприятиями и связи между данными мероприятиями, автоматически создадутся связи и с мероприятиями, приведенными в окне «Сопутствующие связи».

Для просмотра уже созданных связей в окне «Параметры для анализа» (рис. 5) необходимо нажать кнопку «Связи». После чего в появившемся окне из «Меню» выбрать необходимое действие (рис. 11).

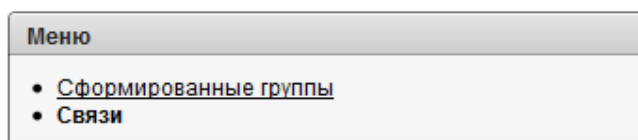


Рис. 11. Подраздел «Связь между системами», окно «Меню»

При выборе пункта «Сформированные группы» будет выведен список групп (рис. 12), а при выборе «Связи» пользователю будут предоставлены данные по всем сформированным связям (рис. 13).

№ Группы	Наименование	Место проведения	Статус	Дата начала	Дата окончания
1	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	СПб ГУ ИТМО, Санкт-Петербург	Региональный	20.04.2010	23.04.2010
1	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	ГОУ ВПО "СПб ГУ ИТМО"	Федеральный	20.04.2010	23.04.2010
1	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	-	Федеральный	20.04.2010	23.04.2010
2	XVII Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем", "Яльчик-2010"	Республика Марий Эл, Яльчик	Федеральный	28.06.2010	02.07.2010
2	XVII Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем. Яльчик-2010"	г. Уфа, Яльчик	Федеральный	28.06.2010	02.07.2010
2	ХУП Всероссийская КОНФЕРЕНЦИЯ "СТРУКТУРА И ДИНАМИКА МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ. Яльчик 2010"	п. Яльчик	Федеральный	28.06.2010	03.07.2010

1 - 6

Рис. 12. Подраздел «Связь между системами», окно «Сформированные группы»

	Наименование 1	Наименование 2	Совпадение %	Результат
<input checked="" type="checkbox"/>	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	100	Объединенная
<input checked="" type="checkbox"/>	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	100	Объединенная
<input checked="" type="checkbox"/>	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	100	Объединенная
<input checked="" type="checkbox"/>	XVII Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем", "Яльчик-2010"	XVII Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем. Яльчик-2010"	90	Объединенная
<input checked="" type="checkbox"/>	XVII Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем", "Яльчик-2010"	ХУП Всероссийская КОНФЕРЕНЦИЯ "СТРУКТУРА И ДИНАМИКА МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ. Яльчик 2010"	84	Объединенная
<input checked="" type="checkbox"/>	ХУП Всероссийская КОНФЕРЕНЦИЯ "СТРУКТУРА И ДИНАМИКА МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ Яльчик 2010"	XVII Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем. Яльчик-2010"	93	Объединенная

1 - 6

Рис. 13. Подраздел «Связь между системами», окно «Связи»

Как видно из рис. 13, около созданных связей есть поле «Результат», которое показывает пользователю, объединены мероприятия или нет. Также можно выбрать необходимую связь и разорвать ее. Для этого нужно нажать на кнопку «редактирование» и перейти в режим редактирования связи.

Анализ систем информационной поддержки проектной деятельности

На рис. 14 представлены основные функции раздела «СППД».

Как и в разделе «Анализ внешних систем», пользователю здесь доступно окно «Статистика». В отличие от предыдущего оно показывает все доступные пользователю системы и их параметры (рис. 15).

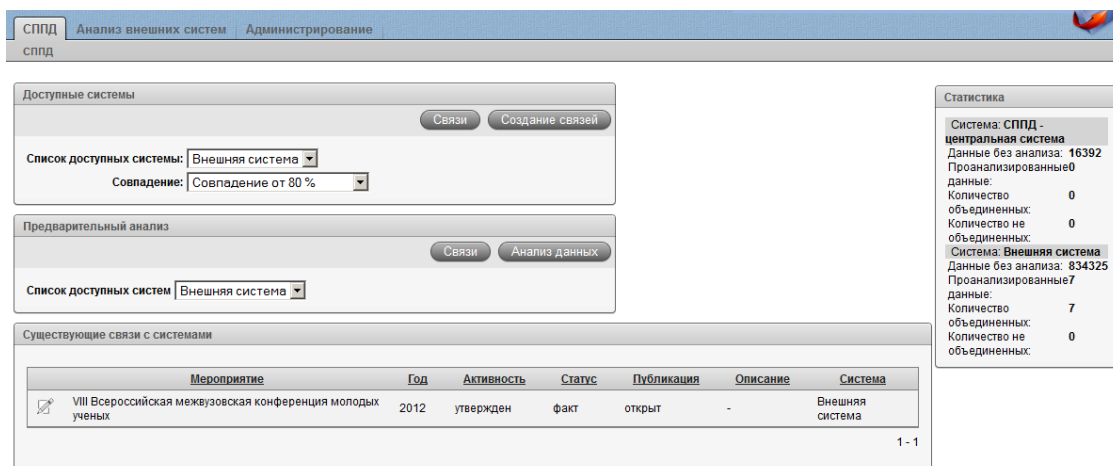


Рис. 14. Раздел «СППД»

Статистика	
Система: СППД - центральная система	
Данные без анализа:	16392
Проанализированные данные:	0
Количество объединенных:	0
Количество не объединенных:	0
Система: Внешняя система	
Данные без анализа:	834325
Проанализированные данные:	7
Количество объединенных:	7
Количество не объединенных:	0

Рис. 15. Раздел «СППД», окно «Статистика»

В разделе «СППД» в отличие от раздела «Анализ внешних систем» предусмотрено окно «Существующие связи с системами», в котором отображаются все результаты объединения СППД с другими системами. Окна «Предварительный анализ» и «Доступные системы» аналогичны окнам «Предварительный анализ системы» и «Параметры для анализа» в разделе «Анализ внешних систем». Последовательность создания связей осталась такой же: вначале производится предварительный анализ (автоматический), далее пользователь создает на его основе новые связи.

На рис. 16 представлен внешний вид подраздела «Анализ связей с СППД». Он имеет два окна: «Добавление данных в СППД», и «Процентное соотношение» (рис. 17).

При добавлении новых данных в СППД она выводит список групп (рис. 18), из которых пользователь выбирает нужные и добавляет их в СППД (рис. 19).

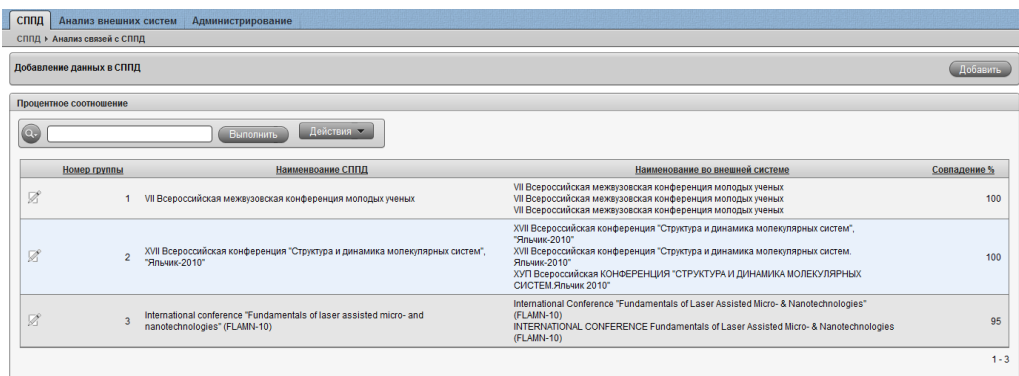


Рис. 16. Подраздел «Анализ связей с СППД»

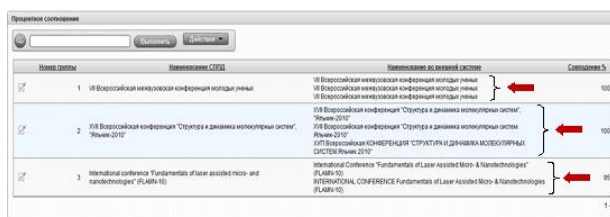


Рис. 17. Подраздел «Анализ связей с СППД», окно «Процентное соотношение»

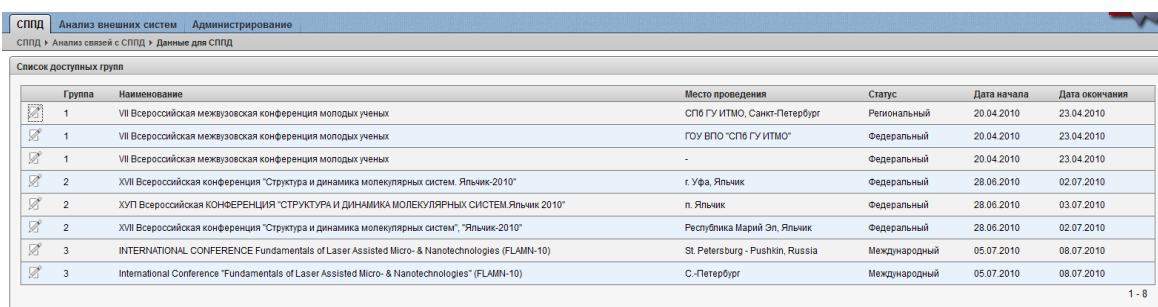


Рис. 18. Подраздел «Данные для СППД», окно «Список доступных групп»

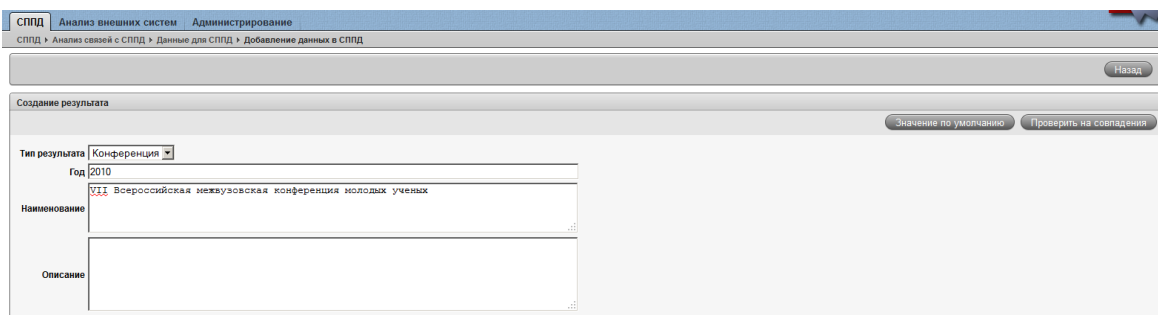


Рис. 19. Подраздел «Добавление данных в СППД», окно «Создание результата»

При этом происходит проверка на дублирование информации. В случае добавления новых данных система создает в базе РНПД новые записи и формирует список дополнительных полей, которыми они описываются (рис. 20).

Рис. 20. Подраздел «Редактирование»

На рис. 21 показано окно «Информация о внешней системе». В нем пользователь заполняет дополнительные поля и вносит коррективы в предоставленную информацию.

Рис. 21. Подраздел «Редактирование», окно «Информация о внешней системе»

Для создания связей между СПИД и системой СФВ необходимо нажать на кнопку «Редактирование» около соответствующей строки (рис. 17). Система предложит создать связь между выбранными РНПД СПИД и СФВ (рис. 22)

Наименование	Место проведения	Статус	Дата начала	Дата окончания
VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	ГБОУ ВПО "СПб ГУ ИТМО"	Федеральный	20.04.2010	23.04.2010
VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых	-	Федеральный	20.04.2010	23.04.2010

Рис. 22. Подраздел «Создание связей с СПИД»

Создание связей между РНПД СПИД и СФВ полностью идентично созданию связей между РНПД СФВ, за исключением возможности перехода к добавлению новых РНПД, не возвращаясь в предыдущие разделы.

В проекте разработаны основные подходы для создания системы централизованного хранения результатов научно-практической деятельности в вузе, а также методы исключения дублирования информации с ориентацией на анализ мероприятий (конференции, выставки, гранты и прочие). Результаты исследования универсальны и могут быть применены в различных учебных заведениях и других учреждениях.

Публикации

1. Вареников Д.А., Лукьянова Г.В. Автоматизированная система для физико-математической школы // Сб. тезисов VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. СПб., 2010. Вып. 1. С. 44.
2. Вареников Д.А., Лукьянова Г.В. Автоматизированная система для физико-математической школы // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. Вып. 73. № 3. С. 122–125.
3. Вареников Д.А., Попова И.А., Шлей М.Д. Вопросы централизованного хранения результатов проектной деятельности // Информационная среда вуза XXI века: Материалы V Международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 2011. С. 153–155.
4. Вареников Д.А., Попова И.А. Система информационной поддержки проектной деятельности: Структура, объекты и субъекты // Труды XIX Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2012». СПб., 2012. Т. 1. С. 151–153.

Литература

1. Вареников Д.А., Попова И.А. Система информационной поддержки проектной деятельности: Структура, объекты и субъекты // Труды XIX Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2012». Т. 1. СПб., 2012. С. 151–153.
2. Вареников Д.А., Попова И.А., Шлей М.Д. Вопросы централизованного хранения результатов проектной деятельности // Информационная среда вуза XXI века: Материалы V Международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 2011. С. 153–155.
3. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Холод И.И., Тесс М.Д., Елизаров С.И. Анализ данных и процессов. СПб., 2009. – 512 с.



Глинчикова Анна Владимировна
Факультет гуманитарный
Кафедра философии
E-mail: Anjuta-@list.ru

РОЛЬ Э. МАЛЛИ В ФОРМИРОВАНИИ ДЕОНТИЧЕСКОЙ ЛОГИКИ

А.В. Глинчикова

Научный руководитель – профессор Аль-Ани Намир Махди

Введение

Цель проекта: анализ идей деонтической логики в трудах австрийского логика Э. Малли, который является одним из ее основоположников. Его логические труды в настоящее время неизвестны отечественным исследователям.

Задачи проекта: анализ предыстории деонтической логики; анализ основоположений «логики воли» Э. Малли (перевод с немецкого языка важнейших фрагментов труда Э. Малли «Gründgesetze des Sollens. Elemente der Logik des Willens» (1926 г.), изложение и анализ идей «логики воли» Э. Малли); обзор имеющихся точек зрения на проект «логики воли» Э. Малли, оценка его творчества.

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

Деонтическая логика является важным направлением современной неклассической логики. Она представляет собой относительно новый и мало разработанный раздел модальной логики, устанавливающий правила построения умозаключений с использованием модальностей морали, права и иных нормативно регулируемых областей социального взаимодействия. Деонтическая логика исследует структуру нормативных высказываний и определяет способы оперирования ими. Ввиду ее исключительной важности для понимания нормативного действия и более адекватной интерпретации нормативного текста деонтическая логика в настоящее время привлекает внимание не только логиков, но и философов, этиков, правоведов, экономистов, социологов и др.

Интерес к логике норм, или деонтической логике, понятен. Нормативные акты и действия играют важную роль в жизни людей. Они являются необходимым условием нормального функционирования и развития общественного целого. Существование общества без норм невозможно. Не случаен факт того, что деонтическая логика широко применяется. Например, она стала важным инструментом для решения вопросов о следовании одних норм из других, о месте и роли норм в научном и ином знании, о взаимных связях норм и оценок, норм и описательных высказываний и т. д.

Помимо этого возрастает интерес к деонтической логике и со стороны информатики, что диктуется внедрением информационных технологий в различные практики, в том числе и в правовую.

История деонтической логики в собственном смысле слова начинается не раньше середины 1920-х. Все, что было до этого времени, следует отнести к ее предыстории.

Когда речь заходит о непосредственных предшественниках современной деонтической логики, то обычно указывают двух логиков Нового времени: Готфрида Вильгельма Лейбница и Иеремию Бентама.

Лейбниц в работе 1672 г. «Элементы естественного права» пишет о том, что все правила и принципы, используемые в алетической модальной логике, могут быть перенесены на модальности права.

Бентам осознал возможность и необходимость построения новой ветви логики, логики воли, или логики повеления. Согласно Лейбницу, норма понимается как предпочитаемое или некое идеальное положение дел, согласно Бентаму – как регулируемое действие. Однако следует при этом заметить, что систематическое развитие идеи логики воли принадлежит не самому Бентаму, а Эрнсту Мали, который разворачивает ее в своей работе [1].

Отечественному исследователю труды Э. Малли до сих пор неизвестны, поэтому данный проект предполагает перевод его текста на русский язык, изложение и анализ идей логика, а также изучение и рассмотрение уже имеющихся точек зрения на его учение о логике норм.

Для решения задач данного проекта использовались сравнительно-исторический и проблемно-исторический методы.

Результаты данного проекта могут позволить отечественным исследователям развивать данное направление в деонтической логике, что приведет к созданию новых усовершенствованных деонтических систем.

Предыстория деонтической логики

Деонтическая логика работает с такими модальными операторами, как «обязательно», «разрешено», «запрещено». Под деонтической модальностью мы понимаем нормативную оценку определенного действия (поведения) человека. С логической точки зрения она

представляет собой специфический вид предикатов (так называемые нормативные предикаты), аргументом которых является подвергнутое нормативной оценке поведение человека [2].

Логика норм выполняет тройную задачу. Она, во-первых, исследует действия и ситуации, обладающие нормативным статусом, то есть статусом долженствования различной степени: сильным, слабым и нулевым. Во-вторых, она изучает нормативные ситуации не только сами по себе и в отношении друг к другу, но и с точки зрения возможности их реализации, их выполнения или невыполнения (нарушения). В-третьих, важной задачей деонтической логики является анализ условных обязательств и норм.

История деонтической логики в собственном смысле слова начинается не раньше середины 1920-х. Все, что было до этого времени, следует отнести к ее предыстории. Только с наступлением второй четверти прошлого столетия предпринимаются первые попытки системной разработки проблем деонтической логики в работах Э. Малли, К. Менгера и др. Более масштабные исследования в данной сфере разворачиваются только после выхода в 1950-х гг. работы финского логика Г. Х. фон Вригта [3]. Он, как известно, вслед за Лейбницем экстраполировал подход, принятый в алетической модальной логике на деонтические модальности.

В настоящее время наряду со «старым модализмом» в духе Г. Х. фон Вригта активно развивается, согласно А.А. Ивину [4], «новый модализм», отдаляющий деонтическую логику от стандартной трактовки алетических и других модальностей. В русле этого «нового модализма» возникают, системы, представляющие деонтическую логику как расширение логик времени, изменения, действия или взаимодействия, сравнительных или абсолютных оценок и т. п.

Первые идеи деонтической логики появились еще в античности. Например, Аристотель допускал существование практических суждений, имеющих целью направлять и контролировать действия людей. Как справедливо отмечает А.Г. Кислов [5] в данной связи, по «крайней мере Диоген Лаэртский в перечне работ Хрисиппа Солского (280–205 гг. до н. э.) указывает недошедший до нас трактат о командах; в «Метафизике» и в ряде других работ Аристотеля имеются замечания о практическом рассуждении, призванном руководить человеческим действием, и приводятся примеры практических силлогизмов со смешанными деонтическими и ассерторическими посылками» [5].

Вместе с тем следует отметить, что логика норм с самого начала мыслилась как особая ветвь алетической модальной логики, и поэтому считалось, что правила для деонтических модальностей формулируются по аналогии с правилами для алетических модальностей. Однако позднее обнаружилась проблематичность подобного подхода. Например, «английский логик XIV в. Роберт Холкот при помощи ряда примеров показывает, что аналогия между алетическими и деонтическими модальностями имеет место, только если не предусматриваются условные обязательства. Подтверждая данное положение, его младший современник Роджер Росет приходит к выводу о том, что существование условных обязательств с неизбежностью приводит к отказу от простого без ограничения перенесения принципов алетической модальной логики в область деонтических модальностей» [6, 384].

Лейбниц в работе [7] пишет о том, что все правила и принципы, используемые в алетической модальной логике, могут быть перенесены на модальности права. Он вводит модальности права, соответствующие современным деонтическим модальностям, и по аналогии с правилами взаимоопределимости между алетическими модальностями выводит некоторые правила взаимоопределимости для деонтических модальностей.

Лейбниц обозначает основные алетические модальные понятия:

- возможно то, что может быть;
- невозможно то, что не может быть;
- необходимо то, что не может не быть;
- контингентно (лат. *contingens* – случайно) то, что может не быть.

Анализируя данные суждения, можно прийти к следующим заключениям:

- высказывание α возможно тогда, когда оно хотя бы в одном случае истинно, или если может быть такое положение дел, которое описано через α ;
- высказывание α невозможно, если оно не истинно ни в одном из случаев, или если не может быть такого положения дел, которое описано через α ;
- высказывание α необходимо, если оно истинно в каждом случае, то есть не может быть такого, что описанное через α положение дел не случится;
- высказывание α контингентно, если оно хотя бы в одном случае не истинно, или если может быть такое, что не случится описанного через α положения дел.

Здесь следует заметить, что Лейбниц употребляет понятие «контингентно» не в современном его значении, включающем как возможное, так и не-необходимое, а лишь в смысле не-необходимости.

Из такого анализа условий истинности модальных высказываний Лейбниц выводит следующие законы:

- если α необходимо, то отрицание α невозможно;
- если α невозможно, тогда отрицание α необходимо;
- все, что необходимо, тем более возможно, или – посредством контрапозиции – все, что невозможно, контингентно, то есть не-необходимо.

Выявление Лейбницем факта совпадения логических отношений деонтических модальностей с логическими отношениями алетических модальностей явилось важным шагом на пути перехода от алетической модальной логики к деонтической логике. Дело в том, что данный факт дает определенное основание экстраполировать по аналогии все известные законы и правила алетической модальной логики на деонтическую логику. Из данной аналогии, в частности стало возможным определять деонтические понятия с помощью алетических понятий и «логической» константы нравственно идеального человека, или просто «добротого человека» (лат. *vir bonus*). При этом «добротого человека» следует понимать как того, кто строго выполняет все приказы, любит всех ближних, или благосклонно ведет себя по отношению к ним. Таким образом, «добрый человек» – это тот, кто служит всем и не вредит никому. В связи с этим Лейбниц рассматривает несколько утверждений:

- должно то, что для добротого человека необходимо;
- дозволено то, что для добротого человека возможно;
- не дозволено то, что для добротого человека невозможно;
- безразлично то, что для добротого человека контингентно.

Рассматриваемые Лейбницем деонтические модальности в современной терминологии можно интерпретировать следующим образом: дозволенное как разрешенное, недозволенное как запрещенное, должно как обязательное.

Если теперь ограничить современные модальные операторы \square и \diamond с помощью индекса «b» для «добротого человека», то можно формализовать «определения» Лейбница следующим образом:

$$O(\alpha) \leftrightarrow \Box_b(\alpha) \quad (\langle\alpha \text{ обязательно}\rangle) \quad (1)$$

$$\neg O(\alpha) \leftrightarrow \neg \Box_b(\alpha) \quad (\langle\alpha \text{ необязательно}\rangle) \quad (2)$$

$$E(\alpha) \leftrightarrow \supseteq_b(\alpha) \quad (\langle\alpha \text{ разрешено}\rangle) \quad (3)$$

$$\zeta(\alpha) \leftrightarrow \neg \supseteq_b(\alpha) \quad (\langle\alpha \text{ запрещено}\rangle) \quad (4)$$

Если совершенно необходимое в алетической логике является также необходимым для «добраго человека», то в таком случае можно, согласно Лейбницу, из законов для алетических модальных операторов вывести соответствующие фундаментальные принципы для деонтических операторов. Поэтому, как пишет Вольфганг Ленцен [8], с точки зрения Лейбница, фактически получается два разных класса законов. Первый класс законов описывает логические отношения деонтических операторов между собой:

- все обязательное разрешено;
- все неразрешенное необязательно (безразлично);
- все обязательное не запрещено, или все запрещенное не обязательно;
- все, противоположное тому, что запрещено, обязательно, точно так же, как и наоборот;
- все, противоположное тому, что не обязательно, разрешено, а все, что противоположно тому, что разрешено, не обязательно.

Эти законы непосредственно отражают соответствующие логические отношения между алетическими модальностями и «доказываются», или делаются убедительными, Лейбницем просто посредством рассмотрения аналогий.

Второй, более интересный класс деонтико-логических законов – принципы, в которых зафиксированы отношения перехода между алетическими и деонтическими понятиями. В «Элементах естественного права» [7] Лейбниц упоминает прежде всего принципы, в которых зафиксированы отношения между алетическими понятиями «необходимо», «возможно» и «невозможно», с одной стороны, а также деонтическими понятиями «обязательно», «разрешено» и «запрещено», с другой:

- все необходимое обязательно;
- все не обязательное не необходимо, но контингентно;
- все необходимое разрешено;
- все неразрешенное не необходимо, но контингентно;
- все разрешенное возможно;
- все невозможное неразрешено;
- все обязательное возможно;
- все невозможное не обязательно.

Именно так в общих чертах из алетической модальной логики Лейбниц выводит деонтическую логику.

В сочинениях И. Бентама [9] содержатся идеи создания особой логики воли, или логики повеления. Согласно Лейбницу, норма понимается как предпочитаемое или некое идеальное положение дел, согласно Бентаму – как регулируемое действие. Бентам также первым высказал идею разграничения прескриптивного и дескриптивного понимания высказываний. Он осознал возможность и необходимость построения новой ветви логики. Фон Вригт назвал идею Бентама «величественной идеей Логике Повеления, или Воли» [10, 245].

«Логика воли» Э. Малли

С начала 1950-х и до 1980-х доминирует линия Лейбница, и логика норм развивается как ответвление модальной (философской) логики. Создание реляционных семантик для стандартных деонтических исчислений вригтовского типа, построенных в духе линии Лейбница, показало проблематичность понимания нормы как идеального положения дел. Особенно сложно оказалось выразить слабую деонтическую модальность («разрешено»), а также отношение достижимости между выделенным и предпочтительным положениями дел.

Работы по логике действий, основанные на идеях фон Вригта, к началу 1990-х привели к тому, что вместо норм как прескриптивно понимаемых выражений отношения между нормативным установлением и его условиями реализации или результатом выполнения (невыполнения) в центре внимания оказались многосортные отношения на основе действий агентов. Развитие логики норм стало продвигаться в духе линии Бентама.

Однако следует при этом заметить, что систематическое развитие идеи логики воли принадлежит не самому Бентаму, а Эрнсту Мали, который разворачивает ее в своей работе [1]. Он предложил первое деонтическое исчисление – «Деонтика», в котором попытался формально выразить понятие агентно-зависимой нормативности. В частности, он разграничил долг, выступающий выражением стратегической цели агента, и деонтическое агентно-независимое безусловное долженствование, выражающее внешнее по отношению к агенту обязательство.

Деонтическое исчисление Малли состоит из пяти постулатов и тридцати пяти теорем. Оно представлено в первой и второй главах его книги. В третьей и четвертой главах даются пояснения.

В своей «деонтике» Малли вводит следующие постулаты:

$$1. ((A \text{ f } B) \wedge (B \supset C)) \supset (A \text{ f } C). \quad (5)$$

Если А влечет В и если В, то С, тогда А влечет С.

$$2. ((M \text{ f } A) \wedge (M \text{ f } B)) \supset (M \text{ f } AB). \quad (6)$$

Если М влечет А и если М влечет В, тогда М влечет А и В.

$$3. (A \text{ f } B) \equiv !(A \supset B). \quad (7)$$

«А влечет В» эквивалентно обязательному «если А, то В».

$$4. (\exists U) !U. \quad (8)$$

Существует такое безусловно обязательное, что оно обязательно.

$$5. U \text{ f } \neg. \quad (9)$$

Безусловно обязательное не влечет своего отрицания.

Малли вводит три различных понятия долженствования: обязательство – в отношении к положению дел, долг – в отношении к представляемому агентом объекту, а также необходимость – в качестве связи первых двух. Основная философская идея Малли, лежащая в основании его исчисления, состоит в том, чтобы уточнить логические отношения между этими тремя понятиями.

В формальном языке своего исчисления Малли использует различные символы для обозначения долга и обязательства: логические свойства долга выражены в первых трех постулатах и отличаются от свойств обязательства, описываемых постулатами 4 и 5. Свойства запрещения и позволения он в своей книге не обсуждает.

В своем деонтическом исчислении Малли провел ряд разграничений, играющих важную роль в логике норм. Он был первым, кто разглядел принципиальное различие между долгом, сформулированным агентом и безусловным долженствованием. Мали – это первопроходец в формировании деонтической логики, не заслуживающий забвения.

Публикации

1. Глинчикова А.В. О логическом статусе отрицания в деонтической логике // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. «Гуманитарные науки». Калининград (в печати). (Журнал входит в перечень российских рецензируемых научных журналов.)
2. Глинчикова А.В. Об истоках деонтической логики в философии Лейбница // Труды гуманитарного факультета СПбГУ ИТМО: Сб. научных статей. СПб. (в печати).
3. Глинчикова А.В. Отрицание в деонтической логике // Сб. тезисов докладов I Всероссийского конгресса молодых ученых. Вып. 3: Труды молодых ученых. СПб., 2012. С. 148–149.
4. Глинчикова А.В. Периодизация развития деонтической логики // Актуальні питання, проблеми та перспективи розвитку гуманітаристики у сучасному інформаційному просторі: Національний та інтернаціональний аспекти: Зб. наукових праць. Ч. 1. Луганськ, 2012. С. 27–29.

Доклады на конференциях

1. XLII научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО (3 февраля 2012 г.). Доклад: О логическом статусе отрицания в деонтической логике.
2. I Всероссийский конгресс молодых ученых (10–13 апреля 2012 г.). Доклад: Отрицание в деонтической логике.
3. IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы, проблемы и перспективы развития гуманитаристики в современном информационном пространстве: Национальные и интернациональные аспекты» (30–31 мая 2012 г.). Доклад: Периодизация развития деонтической логики.
4. Метафизика Лейбница и феноменология виртуальности (20–21 июня 2012 г.). Пленарный доклад: Об истоках деонтической логики в философии Лейбница.

Литература

1. Mally E. Grundgesetze des Sollens: Elemente der Logik des Willens. Graz, 1926. Reprinted in: Mally E. Logische Schriften: Großes Logikfragment, Grundgesetze des Sollens / K. Wolf, P. Weingartner (eds.). Dordrecht, 1971. P. 227–324.
2. Knapp V. Einige Probleme der deontischen Modalität «erlaubt» // Archiv für Rechts- und Sozialphilosophie. 1981. Vol. 77. № 3. P. 397–406.
3. Кислов А.Г. Деонтическая логика: Традиция Бентама и динамика действий // Философский век. Альманах. Вып. 9: Наука о морали: Дж. Бентам и Россия. СПб., 1999. С. 288–293.
4. Lenzen W. Zur Logik alethischer und deontischer Modalitäten bei Leibniz // W. Stelzner (ed.). Ursprünge und Entwürfe nichtklassischer logischer Ansätze im Übergang von traditioneller zu moderner Logik. Paderborn, 2001. P. 335–351.
5. Вригт Г. Х. фон. О логике норм и действий // Вригт Г. Х. фон. Логико-философские исследования: Избранные труды. М., 1998. С. 245–289.



Итин Алексей Леонидович
Факультет инженерно-физический
Кафедра твердотельной оптоэлектроники
E-mail: ialexey@bk.ru

СЕНСОР КОНЦЕНТРАЦИИ CO₂ В АТМОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

А.Л. Итин

Научный руководитель – профессор Ю.Л. Колесников

Введение

Цель работы: создание и исследование оптико-электронной системы по определению концентрации CO₂ в атмосфере на основе фурье-спектрометра (ФС).

Задачи:

- создание и исследование компьютерной модели для выбора варианта построения оптико-электронной системы;
- разработка структурной и оптической схемы оптико-электронной системы (ОЭС) определения концентрации газа;
- конструкции приемного блока ОЭС.

В настоящее время измерение концентраций газов является одной из ключевых проблем в промышленности и бытовой деятельности. Важнейшая задача, стоящая перед промышленными методами контроля, заключается в установлении связей между составом газа и каким-либо легко измеряемым его свойством. Выявленные закономерности используются для разработки способов определения концентрации газа и соответствующих устройств, к которым можно отнести химические сенсоры. Они дают прямую информацию о химическом составе среды (раствора), с которой взаимодействуют, без отбора анализируемой пробы и ее специальной подготовки. Сенсорные анализаторы могут работать автономно без вмешательства оператора, используя системы накопления и автоматизированной обработки информации. Значение таких сенсоров и созданных на их основе анализаторов в контроле состояния среды обитания и охране здоровья человека трудно переоценить.

Один из самых перспективных видов сенсоров – оптические химические сенсоры, определяющие концентрацию газов. Они имеют некоторые особенности и определенную область применения (Табл. 1).

Таблица 1

Оптические газовые сенсоры

Тип сенсора	Объект обнаружения	Типичное применение
Недиспергирующие инфракрасного поглощения	Газы со средним ИК-поглощением, например, CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, NO и др.	Выбросы дымовых газов, здоровье и безопасность, хранение и упаковка продуктов питания, медицинский газовый анализ
ИК-Фурье	Большинство ИК-поглощающих	Выбросы дымовых газов, газовый анализ в динамике, экологический

		мониторинг, мониторинг процессов и др.
Фотоакустическая абсорбционная спектроскопия	Большинство ИК-поглощающих	Газовый анализ в динамике
Абсорбционная спектроскопия на настраиваемых лазерных диодах	Большинство ИК-поглощающих	Появляющееся применение, например, в выбросах дымовых газов, газовом анализе в динамике и анализ влаги
Спектроскопия внутрирезонаторного спада сигнала во времени	Большинство ИК-поглощающих	Появляющееся применение, например, в газовом анализе в динамике и анализ влаги
Лидар дифференциального поглощения	Большинство поглощающих в ИК-, УФ- и видимом диапазонах	Дистанционное обнаружение газов в атмосфере и вокруг промышленных предприятий и т. д.
УФ-поглощение	O ₃ , NO, H ₂ S, HCl	Мониторинг качества атмосферного воздуха, выбросы дымовых газов
УФ-флуоресценция	SO ₂ (модифицированный вариант для H ₂ S)	Мониторинг качества атмосферного воздуха
УФ дифференциальная оптическая спектроскопия	O ₃ , H ₂ S, NH ₃ , C ₆ H ₆ , NO ₂ и др.	Экологические наблюдения за качеством воздуха
Хемилюминесценция	NO _x (NO, NO ₂)	Мониторинг качества атмосферного воздуха, выбросы дымовых газов
Фотоионизация	Летучие органические соединения	Здоровье и безопасность

Многие из наиболее важных методов оптического обнаружения газов используют поглощение, которое является критическим эффектом, потому что некоторые горючие и токсичные газы имеют сильные фундаментальные полосы поглощения в 2–5 мкм (среднего ИК) области спектра (CH₄ – 3,3 мкм, H₂S – 2,7 мкм, CO₂ – 4,2 мкм, CO – 4,6 мкм, NH₃ – 2,3 мкм). Некоторые из газов, обнаруживаемые с помощью поглощения в УФ- и ИК-диапазонах представлены в Табл. 2.

Таблица 2

Спектральные участки поглощения газов

Спектральный участок	Обнаруживаемые газы
ИК	CO, CO ₂ , CH ₄ , NO, SF ₆ , NH ₃ , H ₂ O, HCl
УФ	O ₃ , H ₂ S, SO ₂ , NO, NO ₂ , NH ₃ , C ₆ H ₆ , Cl ₂

Согласно Табл. 2 поглощение исследуемого газа находится в ИК-участке спектра. В Табл. 3 представлены методы, используемые при построении сенсорных систем.

Таблица 3

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

Методы построения сенсоров, использующих поглощения

Метод	Принцип работы
Недиспергирующие инфракрасного поглощения (НДИП)	Самый простой метод. В ИК-диапазоне поглощается целевой газ на пути между источником и детектором. Поглощающая длина волны отобрана с помощью оптических фильтров. Некоторые виды используют второй опорный пучок света
Спектрометр с газофильствующей коррекцией	Две ячейки (одна наполняется исследуемым газом, вторая – непоглощающим газом) поочередно помещают в пучок. Разница в регистрируемом излучении соответствует концентрации исследуемого газа
УФ-поглощение	Поглощение УФ-излучения, характерное для целевого газа, например 254 нм для O ₃ . Эффективный УФ-аналог НДИП. Может быть использован с солнечным излучением для обнаружения атмосферного газа O ₃
УФ дифференциальная оптическая спектроскопия	Как правило, используется в УФ- и видимом диапазонах. Разница в интенсивности сигнала для поглощающих и непоглощающих длин волн используется для определения концентрации газа
Фотоакустическая абсорбционная спектроскопия	Газ в условиях пульсирующей инфракрасной радиации начинает излучать волны определенной длины. Периодические сужения и расширения вызывают флуктуацию давления звуковой частоты, что может быть зафиксировано с помощью микрофона
Абсорбционная спектроскопия на настраиваемых лазерных диодах	Происходит ИК-поглощение, при котором в качестве источника используют перестраиваемые лазерные диоды. Высокочувствительная техника, часто применяются многоходовые ячейки для увеличения длины пути и разрешения
Спектроскопия внутрирезонаторного спада сигнала во времени	Измерение времени затухания инфракрасного света, многократно отраженного и поглощенного между двумя зеркалами в ячейке, содержащей пробу газа. Эффективный путь длиной в несколько километров приводит к высокой чувствительности
ИК-Фурье спектроскопия	Свет входит в интерферометр Майкельсона перед прохождением через газовый образец, создающий интерферограмму, которая анализируется путем вычисления ее Фурье-преобразования для приведения к спектру длины волны. Подходит для многокомпонентного зондирования

Наиболее распространенным для анализа концентраций CO, CO₂, SO₂, NO, NO₂, C_xH_y в составе многокомпонентных газовых смесей является метод ИК-спектроскопии. Наличие узких селективных полос поглощения разной интенсивности в ИК-области спектра, характерных для каждого анализируемого компонента позволяет выбирать оптимальные условия измерения, а также разработать оптические сенсоры для приборов газового анализа с высокими селективными возможностями [2].

Используя излучения конкретной длины волны, можно определить концентрацию соответствующего компонента с высокой точностью, так как применяется явление избирательного поглощения многоатомными молекулами излучения при его прохождении сквозь среду. Избирательное поглощение объясняется тем, что оно происходит на тех волнах, частота которых является резонансной для соответствующих молекул.

Такие устройства обнаружения и измерения концентрации газов, работающие в диапазоне 2–15 мкм реализуется в основном в сенсорах, относящихся к портативным. Такие сенсоры превосходят по своим возможностям электрохимические и каталитические методы, обеспечивая высокое быстродействие, селективность, устойчивость к агрессивным средам, продолжительный срок службы [3].

Научный раздел

Сенсоры, использующие преобразование Фурье для ИК-дистанционного зондирования, все чаще используются для обнаружения и идентификации загрязняющих веществ в газовой фазе в открытом пространстве. По сравнению с традиционными методами отбора проб, дистанционное зондирование ИК-Фурье спектроскопии имеет ряд преимуществ:

- универсальность для обнаружения многоатомных молекул,
- быстрый анализ многокомпонентных смесей,
- мониторинг в реальном времени газообразных выбросов на расстоянии,
- большую площадь отбора проб без предварительной подготовки и обработки,
- отсутствие загрязнения датчика во время измерения,
- простоту в эксплуатации и минимальное обслуживание.

Выделяют два типа фурье-спектрометров, значительно отличающихся друг от друга по исполнению и предельным возможностям: динамический фурье-спектрометр (ДФС) – интерферометр, в котором один из двух отражателей подвижен (в качестве отражателя может быть применено, например зеркало), и статический (СФС) – интерферометр с неподвижными отражателями.

ДФС очень похожи на классические лабораторные Фурье-спектрометры и часто используются для исследований загрязнения воздуха, в то время как статические применяются для дистанционного зондирования и пока не достаточно хорошо известны в сообществе ученых. Благодаря высокой чувствительности и компактности современных ИК-Фурье спектрометров приложение их в области мониторинга и управления технологическими процессами увеличивается.

В ДФС изменение разности хода оптического луча происходит во времени, и синхронно с этим процессом снимается интерферограмма исследуемого излучения. Серийно выпускаемые приборы подобного типа практически полностью заменили классические лабораторные спектральные устройства, основанные на применении дифракционных решеток.

Вообще для малых концентраций (парциальное давление) чувствительность этого метода обнаружения повышается с увеличением:

- оптической пропускной способности датчика,
- коэффициента пропускания и эффективности модуляции спектрометра,
- чувствительности ИК-детектора элемента,
- длины оптического пути,
- сечения поглощения, то есть целевого коэффициента поглощения молекулы,
- числа добавочных спектров.

Ввиду отсутствия подвижных элементов в устройстве СФС он является более надежным в эксплуатации. Для анализа газового состава среды в СФС анализируют пространственное расположение интерферограммы, сфокусированной на фотоприемнике. При использовании матричного фотоприемника возможна максимально быстрая регистрация сигнала, ограничивающаяся только его величиной, а также быстродействием и конструктивными особенностями приемника. Спектральное разрешение таких датчиков ограничивается числом пикселей N линейки приемников, где происходит фиксация. Как правило, относительное спектральное разрешение не может превышать значения $N/2$. Требуемое число разрешаемых спектральных интервалов в большинстве систем для анализа газового состава среды лежит в пределах 200–400, что легко может быть достигнуто с помощью СФС.

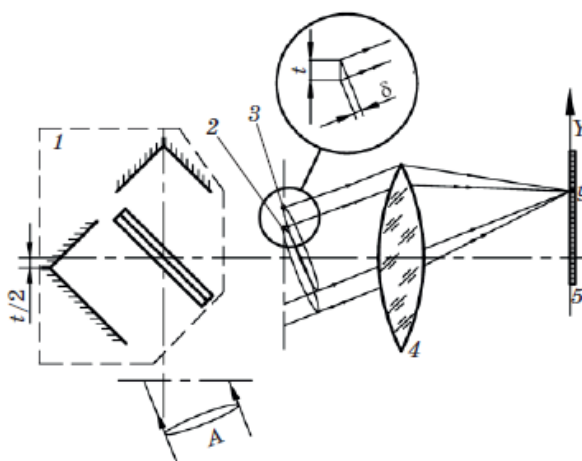


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема статического фурье-спектрометра, выполненная на основе интерферометра Майкельсона: 1 – интерферометр Майкельсона, 2 и 3 – волновые фронты, 4 – объектив, 5 – линейка приемников [4]

В большинстве типов ФС изображение исследуемой сцены переносится на приемную матрицу. На каждый пиксел приемной матрицы попадает излучение всего спектрального диапазона исследуемой сцены, прошедшее через прибор. Поэтому при однонаправленном движении носителя в этих приборах может быть осуществлен режим снятия интерферограммы, позволяющий производить значительное накопление сигнала (режим windowing). В этом случае матрица фотоприемников располагается, например таким образом, что столбцы матрицы оказываются параллельными, а строки перпендикулярными однонаправленному движению носителя. Тогда в статическом интерферометре изменение разности хода проводится вдоль столбцов.

При движении носителя интерферограмма последовательно снимается с каждого пиксела столбца матрицы при перемещении исследуемой точки пространства на поверхности вдоль столбца с пиксела на пиксел. Таким образом, время съема каждой интерферограммы увеличивается на число пикселей N в используемом столбце матрицы, а отношение сигнал / шум в полученной интерферограмме (спектрограмме) – на N . Этот режим можно организовать только в ФС, что обеспечивает им еще одно значительное преимущество, кроме вышеперечисленных, – возможность накопления сигнала за время прохода исследуемого объекта по всему столбцу матрицы приемников.

Для реализации принципа СФС используют интерферометр сдвига, в котором интерферирующие фронты сдвинуты не вдоль оптической оси, а в плоскости, перпендикулярной ей.

Особенностью такой схемы является то, что контраст интерференционных полос, локализованных в фокальной плоскости объектива, в первом приближении не зависит от размеров входного зрачка объектива. В качестве интерферометра сдвига чаще всего используется интерферометр Саньяка. Для уменьшения размеров и обеспечения стабильности параметров приборов возможно использование интерферометра Майкельсона с «крышеобразными» концевыми отражателями, смещенными относительно друг друга на $t/2$.

Типичными областями применения СФС являются:

- надежная идентификация опасных промышленных газообразных соединений,
- наблюдение дымовых газовых факелов,
- гражданская оборона и пожарная безопасность (химические аварии, пожары),
- дистанционное зондирование авиационной эмиссии,
- обнаружение боевых отравляющих веществ в боевых условиях.

СФС является единственным средством обнаружения, которое позволяет обнаруживать опасные вещества в атмосфере мобильно, быстро, с безопасного расстояния.

Один из основных показателей, определяющих режим работы сенсора, – длина волны излучения, в соответствии с которой подбираются необходимые источник и приемник излучения. Длина волны для данного сенсора подбиралась в соответствии с графиком инфракрасного спектра поглощения CO₂. Диапазон длин волн выбран согласно максимальному значению коэффициента поглощения. Для получения точных значений были использованы таблицы международной базы данных HITRAN (High-resolution TRANsmission molecular absorption database), согласно которым $\lambda_1 = 1,58$ мкм, $\lambda_2 = 4,2$ мкм, $\lambda_3 = 2,7$ мкм.

Оптическая схема СФС построена в виде двух каналов с независимыми оптическими системами: базового, работающего в спектральном диапазоне 2,5–5,0 мкм, и проверочного – в диапазоне 1,0–2,3 мкм.

Достигнутые результаты

В обеих системах используется линзовый объектив, а в качестве приемника предлагаются матрицы Hupix Semiconductor YACBAA0S 640x480 с размерами элементов 2,25x2,25 мкм. Для проверочной системы максимальная разность хода $\delta_{\max} = 240$ мкм, эквивалентное фокусное расстояние 5 мм при значении $t = 1$ мм, число регистрируемых спектральных интервалов $M = 270$. Для базовой системы максимальная разность хода $\delta_{\max} = 600$ мкм, эквивалентное фокусное расстояние 2 мм при значении $t = 1$ мм, число регистрируемых спектральных интервалов $M = 240$.

Конструктивно каждый модуль состоит из следующих основных частей: интерферометра, объектива, узла фотоприемника и бленды для защиты аппаратуры от попадания на фотоприемное устройство прямых солнечных лучей. Собственно интерферометр (рис. 2) состоит из полупрозрачной пластины 1 и двух отражателей 2 и 3 (каждый из них это призма-крыша типа БР-180°), расположенных относительно оптической оси системы так, чтобы образовать требуемый сдвиг t интерферирующих пучков.

Полупрозрачная пластина и отражатели прикреплены к общему основанию 4, изготовленному из материала с коэффициентом линейного расширения, близким к коэффициенту линейного расширения материала полупрозрачной пластины и отражателей. Объектив, как и фотоприемное устройство, крепится к задней стенке корпуса (рис. 1), что обеспечивает стабильность их взаимного положения. Следовательно, при использовании статического фурье-спектрометра, имеющего входное окно размером 40x40 мм, практически

во всех спектральных диапазонах можно получить удовлетворительное отношение сигнал/шум всех исследуемых сцен и достаточное количество разрешаемых спектральных интервалов, количество которых определяется числом строк применяемой фотоприемной матрицы.

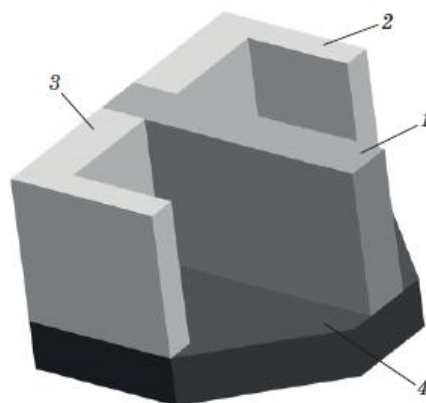


Рис. 2. Общий вид интерферометра сдвига на основе интерферометра Майкельсона

Полученные результаты позволяют создать макет сенсора, который должен подтвердить верность математических расчетов. Выполненные разработки можно использовать в системах контроля концентрации углекислого газа, в пожарных системах безопасности, в области автомобилестроения и др.

Публикации

Itin A.L. Sensor of CO₂ concentration in the atmosphere based on Fourier transform spectrometer // Technical digest of 8th International conference on ODF, 2012. P. 333–334.

Литература

1. Capone S., Forleo A., Francioso L., Rella R., Siciliano P., Spadavecchia J., Presicce D. S., Taurino A. M. Journal of optoelectronics and advanced materials. 2003. Vol. 5. № 5. P. 1335–1348.
2. Кабацкий В.Н. Оптические сенсоры газов на основе полупроводниковых источников ИК-излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 4. С. 30–35.
3. Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А., Матвеев Б.А., Сотникова Г.Ю., Ременный М.А. Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего ИК-диапазона спектра // Журнал технической физики. 2009. Т. 79. Вып. 6. С. 112–118.
4. Горбунов Г.Г., Демин А.В., Никифоров В.О., Савицкий А.М., Скворцов Ю.С., Сокольский М.Н., Трегуб В.П. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // Оптический журнал. 2009. Т. 76. Вып. 10. С. 75–81.
5. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CFA) V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics (IAO) // HITRAN on the Web (09.01.2012): <http://hitran.iao.ru>.



Капитанюк Юрий Андреевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: yura.kapitanjuk@gmail.com

ТРАЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

Ю.А. Капитанюк

Научный руководитель – доцент С.А. Чепинский

Введение

Требования к системам управления движением наземных, морских и воздушных объектов возрастают каждым днем. Одно из направлений работы в данной сфере – решение задачи траекторного управления, то есть перемещения автономного подвижного объекта в рабочем пространстве по предписанной траектории, заданной путевыми точками. Особую актуальность данная проблема приобрела в связи с бурным развитием беспилотных устройств, для которых движение вдоль заданной траектории является одним из основных режимов работы.

Существуют два главных подхода к построению такого рода систем [1, 2]. Для первого свойственна разработка следящей системы, управляемой некоторой эталонной моделью [3, 4]. Как правило, в такой системе траектория параметризуется некоторой функцией, зависящей от времени. На практике это приводит к проблемам, связанным с отставанием или, наоборот, опережением движения объекта, вызванными параметрическими неопределенностями или внешними возмущениями от заданной программы. Это может негативно сказаться на устойчивости работы системы и качестве переходных процессов.

В качестве альтернативы существует подход, базирующийся на стабилизации инвариантных многообразий в пространстве состояний [2]. Проще говоря, для исходной системы выбирается преобразование, образующее в пространстве состояния некоторый аттрактор. В траекторных задачах его роль играет желаемая траектория, заданная в терминах выходных координат. Стабилизация результирующей преобразованной системы гораздо менее трудоемкая задача, чем построение следящей системы в рамках первого подхода. С другими преимуществами этого метода можно ознакомиться в работе [1].

Как объект управления автономный робот является многоканальной нелинейной динамической системой. Задача, решаемая системой управления подвижного робота, заключается в создании управляющих воздействий, обеспечивающих заранее заданное перемещение центра масс в рабочем пространстве.

Предлагаемый метод построения системы управления основан на втором подходе и предусматривает нелинейное преобразование модели робота к системе задачно-ориентированных координат. Это дает возможность свести сложную многоканальную задачу управления к ряду простых задач компенсации линейных и угловых отклонений, а затем с помощью стандартных приемов нелинейной стабилизации [5, 13] найти адекватные законы управления. Основные результаты являются развитием известных решений задач управления пространственным движением, предложенных в [5, 7, 12], и представлены методикой анализа

и процедурой синтеза регуляторов. Они обеспечивают решение траекторной задачи как задачи стабилизации относительно гладких отрезков предписанных типовых участков пути, таких как прямая и окружность, из которых строится желаемая траектория движения, заданная с помощью путевых точек.

Методы исследования

Теоретической базой для решения данной задачи являются дифференциально-геометрические методы нелинейной теории управления [1, 5, 8], используемые для нахождения диффеоморфного преобразования исходной нелинейной многосвязной модели к задачно-ориентированному виду, базирующемуся на специальном представлении желаемой кривой в рабочем пространстве, полученном с использованием дифференциальной геометрии кривых.

Достигнутые результаты

Положение корпуса робота (рис. 1) как твердого тела в плоскости $Y = R^2$ характеризуется парой y, α , где $y = (y_1, y_2)$ – вектор декартовых координат центра масс C ; α – угловая ориентация [2].

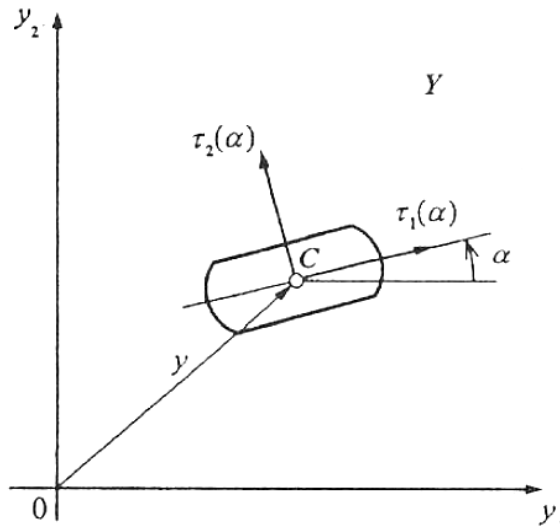


Рис. 1. Автономный робот

С углом α связана ортогональная матрица (матрица вращения):

$$T(\alpha) = \begin{pmatrix} \tau_1^T(\alpha) \\ \tau_2^T(\alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$T(0) = I,$$

соответствующая базису с началом в точке C .

Кинематическая модель движения робота может быть представлена в виде:

$$\dot{y} = T^T(\alpha)v, \quad v = B_y u_y, \quad (2)$$

$$\dot{T}(\alpha) = \omega E T(\alpha), \quad \omega = B_\alpha u_\alpha, \quad (3)$$

где v и ω – линейная и угловая скорости движения, u_y и u_α – управляющие воздействия, B_y и B_α – обратимые матрицы и

$$E = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Траектория робота представляет собой гладкий отрезок кривой S (рис. 2), неявное описание которого имеет вид:

$$\varphi(y) = 0, \quad (4)$$

а соответствующая локальная координата s (путь) определяется выражением

$$s = \psi(y). \quad (5)$$

Необходимо отметить, что описание кривой как гладкого геометрического объекта не единственно, так что и выбор функций (4) и (5) не однозначен.

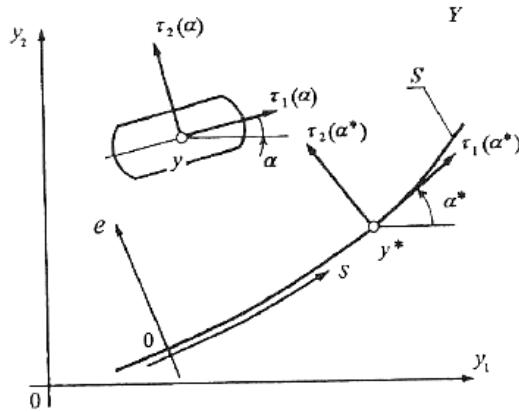


Рис. 2. Траектория S и задачно-ориентированные координаты (s, e)

Предполагается, что функции φ и ψ выбраны таким образом, что при $y \in S$ матрица Якоби

$$M(y) = \begin{vmatrix} \partial\psi / \partial y \\ \partial\varphi / \partial y \end{vmatrix} \quad (6)$$

ортогональна. Введем обозначение

$$T(\alpha) = T(\Delta\alpha)T(\alpha^*), \quad (7)$$

где α^* – угол наклона касательной к кривой S . Матрица $M^*(x)$ определяет связанный с траекторией подвижный базис Френе, который для $y \in S$ удовлетворяет уравнению типа Френе:

$$\dot{T}^*(\alpha^*) = \dot{s}\xi(s)ET^*(\alpha^*), \quad (8)$$

где $\xi(s)$ – кривизна кривой. Матричное уравнение (8) может быть записано в простой форме:

$$\dot{\alpha}^* = \dot{s}\xi(s) \quad (9)$$

Угловую ориентацию робота определим как

$$\alpha = \alpha^* + \Delta\alpha \quad (10)$$

или в матричном виде

$$T(\alpha) = T(\Delta\alpha)T(\alpha^*), \quad (11)$$

где $\Delta\alpha$ – желаемая ориентация относительно траектории движения.

Задача управления траекторным движением автономного робота ставится как задача поддержания голономных соотношений между выходами системы y_i , заданных в форме (4). Она дополняется описанием желаемого режима продольного движения основной точки $s(t)$, обычно устанавливаемого с помощью эталонной переменной $s^*(t)$ или эталонной скорости продольного движения $V_s^* = \dot{s}^*(t)$.

В рассмотрение вводятся ошибки тракторного движения [8–10]. Нарушение условий (4) характеризуется ортогональным отклонением

$$e = \varphi(y), \quad (12)$$

принимающем на множестве S нулевые значения. Текущие нарушения угловых соотношений определяются угловой ошибкой

$$\delta = \alpha - \alpha^* + \Delta\alpha \quad (13)$$

или в матричном виде

$$T(\delta) = T(\alpha_x)T^T(\Delta\alpha)T^T(\alpha^*). \quad (14)$$

Таким образом, задача тракторного управления автономным роботом заключается в определении (в замкнутой форме) входов u_y и u_α , которые обеспечивают:

- а) стабилизацию движения робота относительно кривой s , что подразумевает обнуление вектора пространственных отклонений e ;
- б) стабилизацию заданной угловой ориентации робота относительно кривой s , что подразумевает обнуление вектора пространственных отклонений δ ;
- в) поддержание требуемого режима продольного движения мобильного робота $s = s^*(t)$, часто задаваемого с помощью простейшей эталонной модели

$$\dot{s}^* = V_s^* = \text{const}, \quad (15)$$

или обнуления скоростной ошибки

$$\Delta V_s = V_s^* - \dot{s}. \quad (16)$$

Алгоритм синтеза управления траекторным движением при использовании предложенного метода заключается в переходе от декартовых координат к задачно-ориентированной модели, выраженной с помощью траекторных координат.

Введя в рассмотрение новых задачно-ориентированных входных переменных (вектора пространственных отклонений e , длины пройденного пути s , углового отклонения σ) и преобразовав управление, получим:

$$\begin{vmatrix} \dot{s} \\ \dot{e} \end{vmatrix} = T(\alpha_x^*)T^T(\alpha)v, \quad (17)$$

$$\text{и } \dot{\delta} = -\dot{s}\xi(s) + \omega. \quad (18)$$

Введение виртуальных (локальных) управлений:

$$\begin{vmatrix} u_s \\ u_e \end{vmatrix} = T^T(\Delta\alpha)v, \quad (19)$$

$$u_\delta = -\dot{s}\xi(s) + \omega. \quad (20)$$

Перепишем уравнения (17)–(20) в упрощенном виде:

$$\dot{s} = u_s, \quad (21)$$

$$\dot{e} = u_e, \quad (22)$$

$$\dot{\delta} = u_\delta. \quad (23)$$

Синтез локальных регуляторов:

$$u_s = V_s^*, \quad (24)$$

$$u_e = -K_e e, \quad (25)$$

$$u_\delta = -K_\delta \delta, \quad (26)$$

где K_e, K_δ – выбираются в соответствии с желаемой динамикой.

Синтез регулятора, решающего указанную траекторную задачу:

$$v = T(\Delta\alpha) \begin{pmatrix} u_s \\ u_e \end{pmatrix}, \quad (27)$$

$$\omega = u_\delta + \xi(s)\dot{s} = u_\delta + \xi(s)u_s. \quad (28)$$

Выше была описана общая процедура синтеза траекторного управления. Теперь рассмотрим конкретные примеры реализации типовых траекторий (рис. 3)

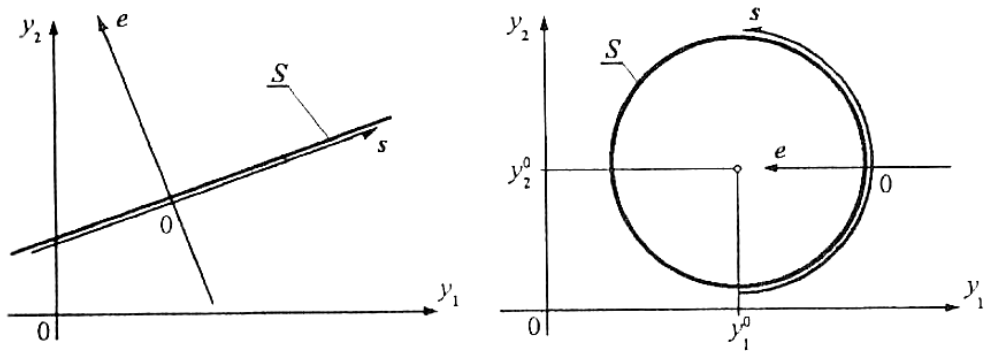


Рис. 3. Задачно-ориентированные координаты для типовых траекторий

Пусть траектория движения робота представлена отрезком прямой. Нормализованное описание прямой дается с помощью уравнений:

$$\varphi(y) = -\sin \alpha^* y_1 + \cos \alpha^* y_2 = 0, \quad (29)$$

$$s(y) = \cos \alpha^* y_1 + \sin \alpha^* y_2, \quad (30)$$

где α^* – угол наклона прямой.

Ортогональная матрица Якоби принимает вид:

$$M(y) = T(\alpha^*) = \begin{pmatrix} \cos \alpha^* & \sin \alpha^* \\ -\sin \alpha^* & \cos \alpha^* \end{pmatrix} \in SO(2). \quad (31)$$

Очевидно, что кривизна траектории имеет нулевую величину. Результат моделирования движения робота вдоль прямой линии представлен на рис. 4.

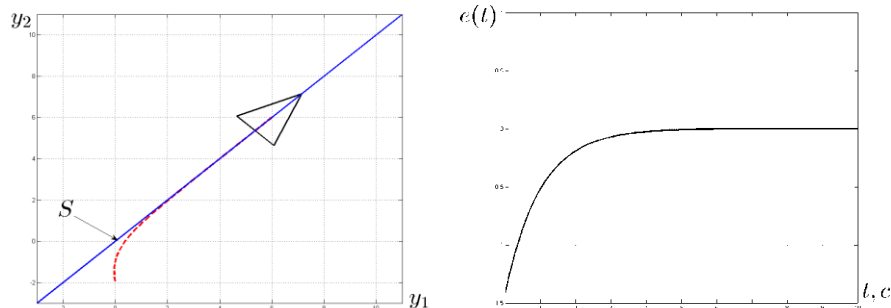


Рис. 4. Движение вдоль отрезка прямой

Теперь рассмотрим случай, когда участок траектории представлен дугой окружности радиуса R с центром в точке $y^0 = (y_1^0, y_2^0)$. Запишем уравнение окружности в виде:

$$\varphi(y) = \frac{1}{2R} (R^2 - \Delta y_1^2 - \Delta y_2^2) = 0, \quad (32)$$

где $\Delta y_1 = y_1 - y_1^0$, $\Delta y_2 = y_2 - y_2^0$. Длина пути определяется как

$$s(y) = R \operatorname{arctg} \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1}. \quad (33)$$

Ортогональная матрица Якоби принимает вид:

$$M(y) = \frac{1}{R} \begin{vmatrix} -\Delta y_2 & \Delta y_1 \\ -\Delta y_1 & -\Delta y_2 \end{vmatrix} \in SO(2). \quad (34)$$

Кривизна траектории определяется как

$$\xi(s) = \frac{1}{R}.$$

Результат моделирования движения робота вдоль окружности представлен на рис. 5.

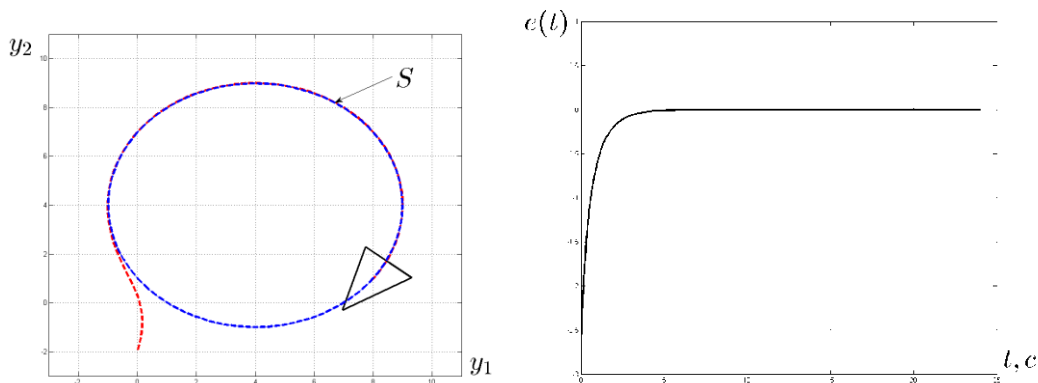


Рис. 5. Движение вдоль окружности

Методы управления вдоль элементарных, базовых гладких кривых были рассмотрены выше, поэтому вполне очевидно, что для движения вдоль сложной, составной траектории необходимо ее параметризовать прямолинейными отрезками и дугами. Управление при этом реализуется в виде гибридного регулятора, включающего алгоритмы движения вдоль прямой и вдоль окружности, и супервизор, содержащий логику переключения. Соответственно, расширяя набор элементарных траекторий можно более гибко параметризовать заданную траекторию, чтобы улучшить качество работы. На рис. 6 представлен результат моделирования движения мобильного робота вдоль составной траектории. Рассмотрим этот пример детальнее.

В качестве исходных данных для задания траектории использовались путевые точки. Это достаточно простой и широко используемый метод. В качестве первого шага мы соединяем эти точки прямолинейными отрезками. Для плавного перехода между отдельными участками введем области перехода, которые задаются с помощью окружностей с заданным радиусом с центром в путевой точке, разделяющей соседние участки. Когда робот оказывается в данной области, регулятор переключается на движение вдоль участка окружности. Параметры движения вдоль этой дуги (центр окружности и радиус) выбираются таким образом, чтобы при выходе из области перехода оказаться как можно ближе к следующему прямолинейному участку.

Таким образом, комбинируя достаточно простые методы можно реализовать полноценную систему траекторного управления мобильными роботами.

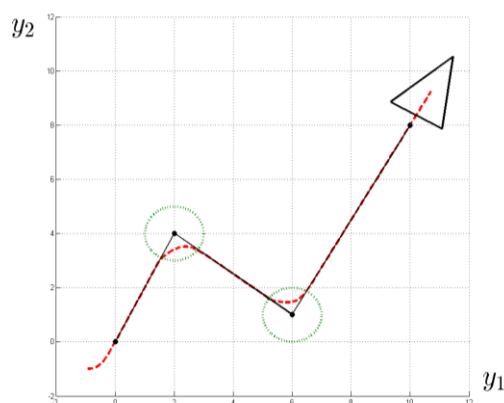


Рис. 6. Движение вдоль составной траектории

Область возможного использования результатов

Результаты исследований могут быть использованы на практике при создании систем управления движением мобильных роботов, беспилотных летательных аппаратов, морских подвижных объектов. В случае успешного решения задачи на теоретическом уровне планируется опытное внедрение разрабатываемых алгоритмов управления в систему динамического позиционирования IVCS4000, выпускаемой ФЛ АО «Навис Энджиниринг».

Также следует отметить важную научную составляющую этой работы. Задачи траекторного управления являются актуальными, особенно в свете чрезвычайно быстрого развития автономных мобильных систем в мировом научном сообществе.

Публикации

По результатам данного исследования планируется представить доклад на V Российской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2012). Также готовится статья, которая будет представлена к публикации в журнал, входящий в перечень Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Aguiar A.P., Hespanha J.P., Kokotovic P.V. Path-following for nonminimum phase systems removes performance limitations // The IEEE transactions on automatic control, 2005. Vol. 50. P. 234–239.
2. Nielsen C., Fulford C., Maggiore M. Path following using transverse feedback linearization: Application to a maglev positioning system // American control conference (ACC'09), 2009. P. 3045–3050.
3. Breivik M., Fossen T. I. Principles of guidance-based path following in 2D and 3D // Proceedings of the IEEE conference on decision and control. Seville, 2005. P. 627–634.
4. Lee T., Leok M., McClamroch N. H. Geometric tracking control of a quadrotor UAV on SE(3) // Proceedings of the IEEE conference on decision and control, Atlanta, Georgia USA, 2010. P. 5420–5425.
5. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб., 2001. – 232 с.
6. Мирошник И.В. Согласованное управление многоканальными системами. Л., 1990. – 128 с.
7. Мирошник И.В., Фрадков А.Л., Никифоров В.О. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб., 2000. – 549 с.

8. Мирошник И.В., Чепинский С.А. Управление многозвенными кинематическими механизмами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Вып. 3: Физические процессы, системы и технологии точной механики. СПб., 2002. С. 144–149.
9. Мирошник И.В., Чепинский С.А. Траекторное управление кинематическими механизмами нетривиальной конструкции // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Вып. 14: Информационные технологии, вычислительные и управляющие системы. СПб., 2004. С. 5–10.
10. Бушуев А.Б., Исаева Е.Г., Морозов С.Н., Чепинский С.А. Управление траекторным движением многоканальных динамических систем // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 11. С. 50–56.
11. Canudas de Wit C., Siciliano B., Bastin G. Theory of robot control. London, 1996. – 392 p.
12. Isidori A. Nonlinear control systems. Berlin, 1995. – 549 p.
13. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O. Trajectory motion control and coordination of multilink robots // Prepr. 13th IFAC World Congress. Vol. A. San-Francisco, 1996. P. 361–366.



Капитонов Александр Александрович
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления информатики
E-mail: kap2fox@gmail.com

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.А. Капитонов

Научный руководитель – профессор А.А. Бобцов

Введение

В настоящее время перед научным сообществом стоит много задач, связанных с управлением в условиях параметрической и функциональной неопределенности [1–8]. При разработке системы управления мобильными робототехническими системами также были использованы методы, позволяющие объекту управления не зависеть от некоторых параметров.

Новые методы управления нелинейными объектами были получены в условиях модельных неопределенностей, возмущений и целевых условий. Также была разработана методика синтеза и частные динамические алгоритмы управления, обеспечивающие заданные показатели качества движения в условиях неопределенности. По результатам данной работы подготовлены методические материалы для реализации полученных алгоритмов на базе Lego Mindstorms.

Цель и задачи

Решение задач, связанных с движением мехатронных объектов в условиях аддитивных, параметрических, структурных и функциональных возмущений, является актуальным и достаточно перспективным направлением.

Будем рассматривать нелинейный объект управления вида:

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

$$\begin{cases} \dot{\chi}_1 = A_\chi \chi_1 + d_\chi \varphi(y) + b_\chi v, \\ y = c_\chi^T \chi_1, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mu \dot{\chi}_2 = F_\chi \chi_2 + qu, \\ v = l^T \chi_2, \end{cases} \quad (2)$$

где $\chi_1 \in R^n$ – вектор переменных состояния системы (1); $\chi_2 \in R^r$ – вектор переменных состояния системы (2); $y \in R$ – измеряемая выходная переменная объекта; функция $v \in R$ – не измеряемая; $u \in R$ – сигнал управления; $A_\chi, F_\chi, b_\chi, c_\chi, d_\chi, q$ и l – матрицы и векторы соответствующей размерности; уравнение (2) представляет асимптотически устойчивую динамику (т. е. матрица F_χ гурвицева), которая не учитывается при синтезе закона управления; число $\mu > 0$ – определяет быстродействие системы (2); $\varphi(y)$ – гладкая нелинейная функция, удовлетворяющая условиям секторных ограничений вида $|\varphi(y)| \leq C|y|$; число $C > 0$ неизвестно.

В результате моделирования и апробации был получен алгоритм управления нелинейными объектами, позволяющий решать задачу слежения за задающим воздействием при наличии неучтенной динамики.

Методы исследования

Теоретической базой для решения подобных задач послужили методы современной теории нелинейного управления, основанные на использовании второго метода Ляпунова, теории пассивных систем, теории робастных и адаптивных систем, методах управления в условиях запаздывания и внешних параметрически не определенных воздействий, а также геометрической теории движения динамических систем. Также использовался метод последовательного компенсатора, позволяющий благодаря теории пассивности получать простые и малоразмерные регуляторы. Данный метод не требует процедуры идентификации системы для расчета коэффициентов закона управления и прост при реализации регулятора на программном уровне. В то же время метод последовательного компенсатора позволяет управлять временем переходных процессов в системе.

Достигнутые результаты

Мы рассматриваем систему вида:

$$\begin{cases} \dot{\chi}_1 = A_\chi \chi_1 + d_\chi \varphi(y) + b_\chi v, \\ y = c_\chi^T \chi_1, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mu \dot{\chi}_2 = F_\chi \chi_2 + qu, \\ v = l^T \chi_2, \end{cases} \quad (4)$$

Перепишем систему (3), (4) в форме «вход-выход»:

$$a(p)y(t) = b(p)v(t) + g(p)\varphi(y), \quad (5)$$

$$d(s)v(t) = d(0)u(t), \quad (6)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; $\mathcal{S} = \mu p$; выходная переменная $y = y(t)$ измеряется, но не ее производные; $b(s) = b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0$, $a(s) = s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0$, $d(s) = d_r s^r + d_{r-1} s^{r-1} + \dots + d_1 s + d_0$, $g(s) = g_e s^e + g_{e-1} s^{e-1} + \dots + g_1 s + g_0$ – полиномы с неизвестными параметрами; S – комплексная переменная; $m \leq n-1$; передаточная функция $\frac{b(s)}{a(s)}$ имеет относительную степень $\rho = n-m$; полином $b(s)$ гурвицев и коэффициент $b_m > 0$.

Выберем закон управления следующим образом:

$$u = -(k + \gamma)\alpha(p)\xi_1, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 y), \end{cases} \quad (8)$$

где число $k > 0$ и полином $\alpha(p)$ степени $\rho-1$ выбираются так, чтобы передаточная функция

$$H(s) = \frac{\alpha(s)b(s)}{a(s) + k\alpha(s)b(s)}$$

была строго вещественно положительной; положительный параметр γ

служит для компенсации нелинейности $\varphi(y)$; число $\sigma > k$; коэффициенты k_i рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (8) при нулевом входе $y(t)$.

Технически реализуемый алгоритм (7), (8) обеспечивает экспоненциальную устойчивость системе (3), (4) в случае $\mu = 0$ (то есть отсутствует неучтенная динамика). Таким образом, требуется найти ограничения на числа μ и σ , при которых система (3)–(8) является экспоненциально устойчивой. Проведем ряд преобразований. Подставляя (7) в (6), получаем:

$$\begin{aligned} v &= \frac{c(p)}{d(p)}(-k + \gamma)\alpha(p)\xi_1 = -(k + \gamma)\alpha(p)\frac{c(p)}{d(p)}\xi_1 = \\ &= -(k + \gamma)\alpha(p)\bar{y} = -(k + \gamma)\alpha(p)(y - \varepsilon_1), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\bar{y} = \frac{c(p)}{d(p)}\xi_1$ и $\varepsilon_1 = y - \bar{y}$.

Тогда для (5) имеем:

$$\begin{aligned} y &= \frac{b(p)}{a(p)}v + \frac{g(p)}{a(p)}\varphi(y) = -(k + \gamma)\frac{\alpha(p)b(p)}{a(p)}(y - \varepsilon_1) + \frac{g(p)}{a(p)}\varphi(y) = \\ &= (k + \gamma)\frac{\alpha(p)b(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}\varepsilon_1 + \frac{g(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}\varphi(y) - \\ &- \gamma\frac{\alpha(p)b(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}y. \end{aligned} \quad (10)$$

Теперь представим модель «вход-выход» (10) в виде модели «вход-состояние-выход»:

$$\dot{x} = Ax + (k + \gamma)b\varepsilon_1 + g\varphi(y) - \gamma by, \quad (11)$$

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

где $x \in R^n$ – вектор переменных состояния модели (11); A , b и c – матрицы перехода от модели «вход-выход» к модели «вход-состояние-выход», причем в силу известной леммы Якубовича-Калмана можно указать симметрическую положительно определенную матрицу P , удовлетворяющую двум следующим матричным уравнениям:

$$A^T P + PA = -Q_1, \quad Pb = c, \quad (13)$$

где $Q_1 = Q_1^T$ – некоторая положительно определенная матрица.

Перепишем (8) и (9) в векторно-матричной форме:

$$\dot{\xi} = \sigma(\Gamma \xi + dk_1 y), \quad \xi_1 = h^T \xi, \quad (14)$$

$$\mu \dot{z} = Fz + q\xi_1, \quad \bar{y} = l^T z, \quad (15)$$

где $\xi \in R^{\rho-1}$ и $z \in R^r$ – векторы переменных состояния моделей (14) и (16) соответственно;

матрица $\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_{\rho-1} \end{bmatrix}$ – гурвицева в силу расчета коэффициентов k_i

модели (8), $d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$, $h = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$; F , q и l – матрицы перехода от модели «вход-выход» к модели

«вход-состояние-выход», будем допускать, что $-Fl = q$.

Введем в рассмотрение векторы отклонений:

$$\eta_1 = ly - z, \quad (16)$$

$$\eta_2 = hy - \xi. \quad (17)$$

Дифференцируя уравнения (16) и (17), получаем:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1 &= l\dot{y} - \mu^{-1}Fz - \mu^{-1}q\xi_1 = \\ &= l\dot{y} - \mu^{-1}F(l y - \eta_1) - \mu^{-1}q(y - \varepsilon_2) = \\ &= l\dot{y} + \mu^{-1}F\eta_1 + \mu^{-1}q\varepsilon_2, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\varepsilon_1 = y - \bar{y} = l^T \eta_1, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_2 &= h\dot{y} - \sigma(\Gamma(hy - \eta_2) + dk_1 y) = h\dot{y} + \sigma\Gamma \eta_2 - \sigma(dk_1 + \Gamma h)y = \\ &= h\dot{y} + \sigma\Gamma \eta_2, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\varepsilon_2 = y - \xi_1 = h^T \eta_2, \quad (21)$$

где $dk_1 = -\Gamma h$ и $-Fl = q$.

Таким образом, имеем систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = Ax + (k + \gamma)b\varepsilon_1 + g\varphi(y) - \gamma by, \quad y = c^T x, \quad (22)$$

$$\dot{\eta}_1 = l\dot{y} + \mu^{-1}F\eta_1 + \mu^{-1}q\varepsilon_2, \quad \varepsilon_1 = l^T \eta_1, \quad (23)$$

$$\dot{\eta}_2 = h\dot{y} + \sigma\Gamma \eta_2, \quad \varepsilon_2 = h^T \eta_2. \quad (24)$$

Положительно определенные матрицы $R = R^T$ и $N = N^T$ удовлетворяют уравнениям Ляпунова:

$$F^T R + RF = -Q_2, \quad (25)$$

$$\Gamma^T N + N\Gamma = -Q_3, \quad (26)$$

где $Q_2 = Q_2^T$ и $Q_3 = Q_3^T$ – положительно определенные матрицы.

Условия работоспособности закона управления (7), (8) для стабилизации системы (3), (4), (22)–(24) приведены в [4].

Область возможного использования результатов

Результаты данного проекта могут быть использованы в различных областях промышленности и техники. В первую очередь, это разработка мобильных робототехнических систем, которые являются актуальным направлением в области систем управления (например, проект Ros.org). На данный момент полученные материалы используются и внедряются в образовательный процесс кафедры систем управления и информатики НИУ ИТМО. Следует отметить важную научную составляющую этой работы. Задачи адаптивного и робастного управления в условиях параметрической неопределенности, структурных и возмущающих воздействий и сегодня являются актуальными в мировом научном сообществе.

Публикации

Результаты работы представлены на 9th IFAC Symposium Advances in Control Education The International Federation of Automatic Control Nizhny Novgorod в 2012 году (С. 102–106). Материалы конференции имеют индекс в системе Scopus.

Литература

1. Арановский С.В., Бардов В.М., Бобцов А.А., Капитонов А.А., Пыркин А.А. Синтез наблюдателя в условиях возмущения процесса измерения выходной переменной // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 11. С. 28–32.
2. Bobtsov A., Kapitonov A., Nikolaev N. Control over the output of nonlinear systems with unaccounted-dynamics // Automation and remote control. 2010. Vol. 71. № 12. P. 2497–2504.
3. Kapitonov A. A., Khovanskiy A. V. Output control of nonlinear systems with unmodelled dynamics // 13th International student Olympiad on automatic control. St. Petersburg, 2010. P. 130–134.
4. Бобцов А.А., Капитонов А.А., Николаев Н.А. Управление по выходу нелинейными системами с неучтенной динамикой // Автоматика и телемеханика. 2010. № 12. С. 3–10.
5. Бобцов А.А., Капитанюк Ю.А., Капитонов А.А., Колюбин С.А., Пыркин А.А., Чепинский С.А., Шаветов С.В. Технология Lego Mindstorms NXT в обучении студентов основам адаптивного управления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 1. С. 103–108.
6. Bobtsov A., Pyrkin A., Kolyubin S., Chepinskiy S., Shavetov S., Kapitanuyuk Yu., Kapitonov A., Titov A., Surov M., Bardov V.I. Using of LEGO Mindstorms NXT technology for teaching of basics of adaptive control theory // Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28–September 2, 2011. P. 9818–9823.

7. Kapitonov A.A., Khovanskiy A.V. Using the Lego Mindstorms NXT for teaching students fundamentals of adaptive control // 14th International student Olympiad on automatic control. St. Petersburg, 2011. P. 64–65.
8. Bobtsov A., Pyrkin A., Kolyubin S., Kapitonov A., Feskov A., Vlasov S., Krasnov A., Khovanskiy A., Shavetov S. Lego Mindstorms NXT for students' research projects in control field // 9th IFAC symposium on advances in control education: The International Federation of Automatic Control. Nizhny Novgorod, 2012. P. 102–106.



Коняхин Алексей Игоревич
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра оптико-электронных систем и комплексов
E-mail: aligkon@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТРЕХМЕРНОГО ИЗГИБА ТРУБОПРОВОДОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А.И. Коняхин

Научный руководитель – доцент А.Н. Тимофеев

Введение

Один из наиболее экологически опасных объектов – магистральные трубопроводы для перекачки нефти или природного газа, а также резервуары для хранения нефти.

Основным показателем, лежащим в основе оценки прочности, прогнозирования надежности и безопасности эксплуатируемых трубопроводных систем, является напряженно-деформированное состояние труб и несущих конструкций.

Сезонные подвижки грунтов, морозное пучение, циклические подмерзания, оползни и другие неконтролируемые природные явления могут привести к возникновению критического уровня напряженно-деформированного состояния в трубопроводе и его разрушению.

Аналогичная проблема возникает и при эксплуатации резервуаров для хранения нефти и горючего. Стационарные резервуары подвергаются различным механическим и тепловым нагрузкам как со стороны внешней среды, так от и подводных трубопроводных устройств и должны выдерживать эти нагрузки без опасных деформаций и разрушений в течение всего срока своей работы.

Указанные нагрузки приводят к деформации изгиба и кручения компонентов трубопровода (рис. 1). Также к подобным многокоординатным деформациям приводит неравномерная осадка наружного контура днища резервуара.

В связи с этим важным вопросом является разработка и внедрение многокоординатных систем контроля пространственных угловых деформаций изгиба и кручения труб, резервуаров и несущих конструкций [1].

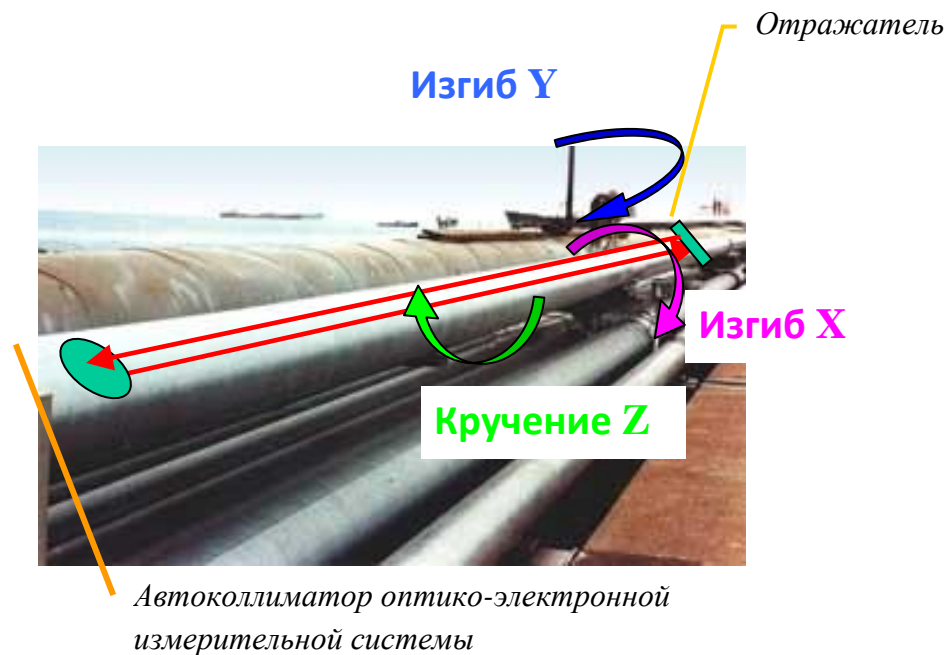


Рис. 1. Изгибы и кручение трубопровода

Для измерения пространственных деформаций эффективны многокоординатные оптико-электронные измерительные системы. Они включают автоколлиматор, установленный в некоторой точке контролируемой конструкции, принимаемой за базовую, и отражатель, расположенный в точке предполагаемой наибольшей пространственной деформации (рис. 1, 2).

Принцип измерения состоит в определении автоколлиматором отклонений световых пучков, отраженных от контрольного элемента при его повороте вследствие угловых деформаций объекта [1].

Угловое положение объекта определено, если измерены углы между тремя ортогональными осями системы координат $X_1Y_1Z_1$, связанной с объектом, и соответствующими осями общей системы координат XYZ , связанной с измерительной системой. При автоколлимационных измерениях на контролируемом объекте закрепляется отражатель, называемый контрольным элементом (КЭ), напротив него на неподвижной базе устанавливается автоколлиматор (АК). При этом визирная ось АК, связанного с пространственной системой координат, должна совпадать с осью симметрии КЭ и одновременно быть направлена ей навстречу.

В этом случае угол поворота отражателя вследствие деформаций кручения объекта вокруг визирной оси OZ прибора называют углом скручивания (крена) Θ_3 , а углы поворота вследствие деформаций изгиба вокруг перпендикулярных им осей OX , OY – коллимационными углами Θ_1 и Θ_2 (рис. 2). Метрологическая задача определения кручения и изгиба как трехмерных деформаций сводится к измерению этих трех углов.

Целью научной работы в рамках гранта является теоретическое и экспериментальное исследование трехкоординатных оптико-электронных систем измерения деформаций пространственного изгиба и скручивания элементов конструкций объектов в трубопроводном транспорте, промышленности и энергетике (в том числе и представляющих экологическую опасность в случае выхода из строя составляющих их компонентов), а также разработка принципов построения таких систем, методов расчета параметров и характеристик их компонентов.

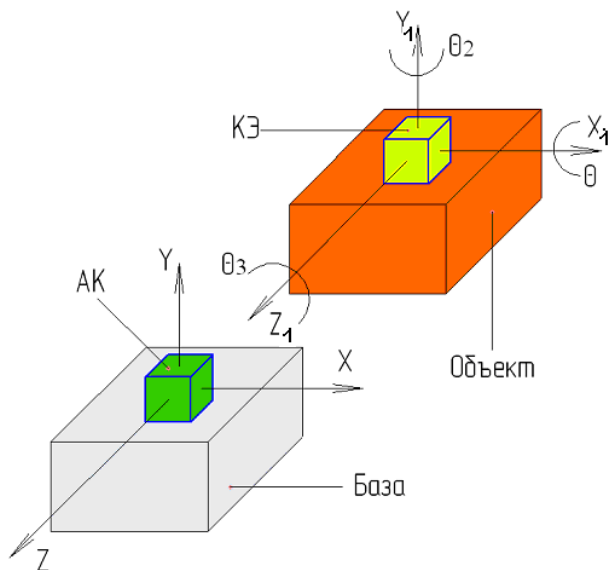


Рис. 2. Системы координат при угловых многокоординатных измерениях с использованием оптико-электронного автоколлиматора: АК – автоколлиматор, КЭ – отражающий контрольный элемент

Метрологические проблемы измерения пространственных деформаций автоколлимационным методом

Схемы построения углоизмерительных систем выбираются исходя из предъявляемых требований, таких как максимальные дистанция измерений и измеряемая величина, количество угловых координат, к которым чувствительна система для измерения пространственных деформаций объекта (только Θ_1 , только Θ_2 , и Θ_1 и Θ_2 , все три координаты Θ_1 , Θ_2 , Θ_3).

Используемая для измерения деформаций углоизмерительная автоколлимационная система состоит из формирующего канала (ФК), оптической системы (ОС), отражателя и приемного канала (ПК) (рис. 3). В ФК входит источник излучения и марка в виде прозрачного точечного отверстия в диафрагме; ОС включает в себя объектив и обычно светоделитель СД, образующий боковой приемный канал; ПК представляет собой матричный приемник оптического излучения и блок обработки сигнала, имеющий выход для подключения вычислительного устройства (микропроцессора) для обработки видеокладов с матричного приемника. Марка формирующего канала и плоскость матричного приемника находятся в фокальной плоскости объектива, но в двух различных каналах, образованных светоделителем [1].

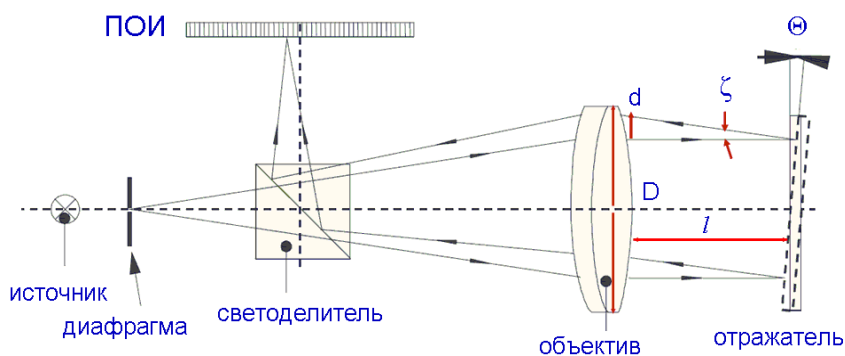


Рис. 3. Структурная схема автоколлимационного угломера

Расходящийся пучок лучей от ФК проходит СД, коллимируется объективом, падает на КЭ и после отражения попадает в объектив, который строит изображение марки на поверхности матричного фотоприемника. При повороте объекта вокруг одной или более осей, например на угол Θ , отраженный пучок отклоняется от первоначального направления на угол ζ , связанный с величиной Θ известной зависимостью. В частности, для плоского зеркала эта связь определяется известным выражением:

$$\zeta = K \cdot \Theta, \quad (1)$$

где K – коэффициент редукции отражающего контрольного элемента (например для плоского зеркала $K = 2$).

Отклонение отраженного пучка приводит к смещению формируемого изображения марки на матричном фотоприемнике на некоторую величину x :

$$x = f \cdot \text{tg}(\zeta), \quad (2)$$

где f – фокусное расстояние объектива автоколлиматора.

Блок обработки в составе матричного приемника оптического излучения и микропроцессора в результате обработки видеокadra с приемника вычисляет величину x смещения изображения, что позволяет из уравнений (1), (2) определить измеряемый угол поворота объекта Θ .

Рассмотренная автоколлимационная система не может использоваться для измерения пространственных деформаций кручения и изгиба элементов трубопроводных систем, нефтяных резервуаров и подобных нагруженных крупногабаритных объектов в трубопроводном транспорте, энергетике и промышленности.

Основные недостатки существующих автоколлимационных систем связаны с несовершенством используемого отражающего элемента – плоского зеркала. Во-первых, он нечувствителен к поворотам на угол скручивания Θ_3 относительно оптической оси объектива (ось OZ на рис. 2). Поэтому измеряет только коллимационные углы деформаций изгиба Θ_1 и Θ_2 относительно осей OX , OY (рис. 2). Во-вторых, имеет слишком большое значение коэффициента редукции K , вследствие чего измерения возможны только на малых дистанциях, не превышающих 3–4 м.

Действительно, при повороте зеркала на угол Θ относительно оси OX или OY отраженный пучок сместится на величину d в плоскости входного зрачка объектива автоколлиматора, определяемую выражением (рис. 3):

$$d = \text{tg}(\zeta) \cdot l = \text{tg}(K \cdot \Theta) \cdot l, \quad (3)$$

где l – рабочая дистанция до контролируемой точки объекта.

Очевидно, что автоколлимационная система работоспособна только в том случае, когда отраженный пучок находится в пределах апертуры объектива автоколлиматора. При этом предельное значение смещения d равно:

$$d_{\max} = D/2. \quad (4)$$

Тогда при известном диапазоне измерения Θ_{\max} наибольшая дистанция работы автоколлиматора равна:

$$l_{\max} = D/[2\text{tg}(K \cdot \Theta_{\max})]. \quad (5)$$

Поскольку для плоского зеркала $K = 2$, для типового диаметра объектива автоколлиматора $D = 50$ мм и диапазона измерения $\Theta_{\max} = 10''$ рабочая дистанция составит $l_{\max} \approx 4200$ мм, что недостаточно для измерения деформаций элементов трубопроводов, резервуаров и иных крупногабаритных конструкций.

Проанализированные недостатки известных автоколлимационных систем определили следующие направления исследований:

- исследование автоколлимационных отражательных систем, позволяющих определять угол скручивания Θ_3 ;
- исследование отражательных систем с малой величиной коэффициента оптической редукиции ($K = 0,01-0,1$), позволяющих увеличить дистанцию автоколлимационных измерений до десятков и сотен метров;
- исследование алгоритмов измерения трех угловых координат при использовании отражательных систем с метрологическими свойствами, указанными выше;
- проектирование, реализация и экспериментальное исследование отражательных систем со свойствами указанных выше.

Анализ отражательных систем для измерения коллимационных углов (изгибов) и угла скручивания (кручения).

Общий алгоритм автоколлимационных измерений

Согласно алгоритму автоколлимационных измерений, орт отраженного пучка \mathbf{B} выражается произведением матрицы прямого преобразования M_r , описывающей переход от пространственной системы координат $X_1Y_1Z_1$, приданной объекту и связанной с КЭ, к соответствующим осям общей системы координат XYZ , связанной с измерительной системой; матрицы действия отражателя M_d , описывающей формирование отраженного пучка; матрицы обратного преобразования M_r^T , описывающей обратный переход от системы координат КЭ к общей системе координат и орта падающего пучка \mathbf{A} [1, 2]:

$$\mathbf{B} = M_r \cdot M_d \cdot M_r^T \cdot \mathbf{A}. \quad (6)$$

Орт \mathbf{A} с учетом принятого исходного направления падающего пучка против оси OZ_1 определяется матрицей:

$$\mathbf{A} = [0; 0; -1]^T. \quad (7)$$

Рассмотренный алгоритм определяет необходимость исследования свойств отражающих зеркально-призменных систем, используемых для построения КЭ, оптимизацию их матриц действия M_d , а также анализ вариантов задания матрицы преобразования координат M_r .

Обобщенный вид матрицы преобразования координат

Матрица M_r выражается через углы трех последовательных поворотов системы $X_1Y_1Z_1$, связанной с контролируемым объектом, относительно своих координатных осей и может быть задана в виде произведения трех матриц, каждая из которых описывает поворот на угол Θ_1 , Θ_2 или Θ_3 относительно одной оси.

В частности, преобразование координат при повороте относительно оси OX_1 на угол Θ_1 , относительно оси OY_1 на угол Θ_2 и относительно оси OZ_1 на угол Θ_3 , соответственно, определяется матрицами:

$$M_{x_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Theta_1) & -\sin(\Theta_1) \\ 0 & \sin(\Theta_1) & \cos(\Theta_1) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$M_{Y1} = \begin{bmatrix} \cos(\Theta_2) & 0 & \sin(\Theta_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\Theta_2) & 0 & \cos(\Theta_2) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$M_{Z1} = \begin{bmatrix} \cos(\Theta_3) & -\sin(\Theta_3) & 0 \\ \sin(\Theta_3) & \cos(\Theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Матрица M_r в общем случае может быть получена шестью способами, соответствующими различной последовательности поворотов относительно трех координатных осей, задающихся коэффициентами p , v и w (см. Табл.).

Таблица

Варианты задания матрицы преобразования координат M_r через углы последовательных поворотов

Последовательность задания углов поворота	Оси последовательных поворотов	Выражение для матрицы M_r	Значения коэффициентов		
			p	v	w
$\Theta_1 \rightarrow \Theta_2 \rightarrow \Theta_3$	$OX_1 \rightarrow OY_1 \rightarrow OZ_1$	$M_{X1} \cdot M_{Y1} \cdot M_{Z1}$	1	1	1
$\Theta_3 \rightarrow \Theta_1 \rightarrow \Theta_2$	$OZ_1 \rightarrow OX_1 \rightarrow OY_1$	$M_{Z1} \cdot M_{X1} \cdot M_{Y1}$	0	0	1
$\Theta_2 \rightarrow \Theta_3 \rightarrow \Theta_1$	$OY_1 \rightarrow OZ_1 \rightarrow OX_1$	$M_{Y1} \cdot M_{Z1} \cdot M_{X1}$	0	1	0
$\Theta_3 \rightarrow \Theta_2 \rightarrow \Theta_1$	$OZ_1 \rightarrow OY_1 \rightarrow OX_1$	$M_{Z1} \cdot M_{Y1} \cdot M_{X1}$	0	0	0
$\Theta_2 \rightarrow \Theta_1 \rightarrow \Theta_3$	$OY_1 \rightarrow OX_1 \rightarrow OZ_1$	$M_{Y1} \cdot M_{X1} \cdot M_{Z1}$	1	1	0
$\Theta_1 \rightarrow \Theta_3 \rightarrow \Theta_2$	$OX_1 \rightarrow OZ_1 \rightarrow OY_1$	$M_{X1} \cdot M_{Z1} \cdot M_{Y1}$	1	0	1

При малых величинах угловых координат матрица M_r определяется произведением матриц M_{X1} , M_{Y1} , M_{Z1} :

$$M_r = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{2} \cdot (\Theta_3^2 + \Theta_2^2) & -\Theta_3 + (1-w) \cdot \Theta_1 \cdot \Theta_2 & \Theta_2 + (1-p) \cdot \Theta_1 \cdot \Theta_3 \\ \Theta_3 + w \cdot \Theta_1 \cdot \Theta_2 & 1 - \frac{1}{2} \cdot (\Theta_3^2 + \Theta_1^2) & -\Theta_1 + (1-v) \cdot \Theta_2 \cdot \Theta_3 \\ -\Theta_2 + p \cdot \Theta_1 \cdot \Theta_3 & \Theta_1 + v \cdot \Theta_2 \cdot \Theta_3 & 1 - \frac{1}{2} \cdot (\Theta_2^2 + \Theta_1^2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Выражение общего вида для матрицы действия контрольного элемента

Вид матрицы действия зеркально-призмной системы M_d определяется ориентацией характерной оси с ортом \mathbf{u} – основного неизменного направления (ОНН) [2].

В общем случае под неизменным направлением зеркально-призмной системы понимается направление свободного вектора \mathbf{U} , называемого также собственным вектором, которое не меняется (или меняется на противоположное) после преобразования его системой. Фактически это означает, что в случае параллельности ортов падающего пучка \mathbf{A} и неизменного направления \mathbf{U} , орт отраженного пучка \mathbf{B} будет ему коллинеарным (противоположно или согласно направленным). При противоположной направленности ортов \mathbf{A} и \mathbf{B} неизменное направление называется обратным, в альтернативной ситуации – прямым.

Изменение направления луча при отражении от зеркально-призмной системы может трактоваться как поворот орта луча на некоторый угол ω относительно оси с ортом \mathbf{u} ОНН. Тогда в случае, если орт ОНН совпадает с ортом одной из координатных осей системы $X_1Y_1Z_1$, связанной с объектом, матрица действия M_d принимает канонический вид и определяется выражениями (8)–(10) для матриц M_r , описывающих поворот относительно соответствующей координатной оси. Так, например, при $\mathbf{u} \parallel \mathbf{i}$, $\mathbf{u} \parallel \mathbf{j}$, $\mathbf{u} \parallel \mathbf{k}$ канонический вид матрицы действия M_{dk} по форме совпадает с матрицами (8), (9), (10):

$$M_{dkx} := \begin{bmatrix} (-1)^k & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$M_{dky} := \begin{bmatrix} \cos(\omega) & 0 & \sin(\omega) \\ 0 & (-1)^k & 0 \\ -\sin(\omega) & 0 & \cos(\omega) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$M_{dkz} := \begin{bmatrix} \cos(\omega) & -\sin(\omega) & 0 \\ \sin(\omega) & \cos(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & (-1)^k \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $k = 2$ при четном количестве отражений луча внутри отражателя и $k = 1$ при нечетном; ω – угол поворота пучка относительно ОНН при отражении.

Исследование контрольных элементов для трехкоординатных автоколлимационных измерений

Анализ общего алгоритма (6) при подстановке выражения (7) для орта падающего пучка, а также матрицы (11) преобразования координат показывает, что при ориентации вектора основного неизменного направления \mathbf{U}_1 эквивалентной зеркальной системы КЭ параллельно коллимационной оси OY_1 ($\mathbf{U} \parallel \mathbf{j}$) (рис. 3), координата y_1 орта \mathbf{V}_1 отраженного пучка определяется уравнением:

$$y = -[\Theta_2 \cdot \Theta_1 \cdot (w-1) + \Theta_3] \cdot \sin(\omega) + \Theta_1 \cdot [\cos(\omega) + (-1)^{k-1}], \quad (15)$$

где Θ_1, Θ_2 , – коллимационные углы, Θ_3 – угол скручивания, ω – угол поворота пучка относительно орта \mathbf{U}_1 при k отражениях, w – параметр, определяющий в соответствии с Табл. последовательность поворотов при формировании матрицы преобразования координат M_r .

Наиболее простой алгоритм измерения реализуется при величинах $\omega = \pi + \Delta$ (Δ – малый угол), $k = 3$, что соответствует эквивалентной зеркальной системе в виде триэдра, углы между гранями которого имеют малые отклонения от 90° и при $w = 1$, определяющем поворот на угол Θ_3 как третий в последовательности поворотов (см. таблицу):

$$y_1 = \Delta \cdot \Theta_3 + (\Delta^2 / 2) \cdot \Theta_1. \quad (16)$$

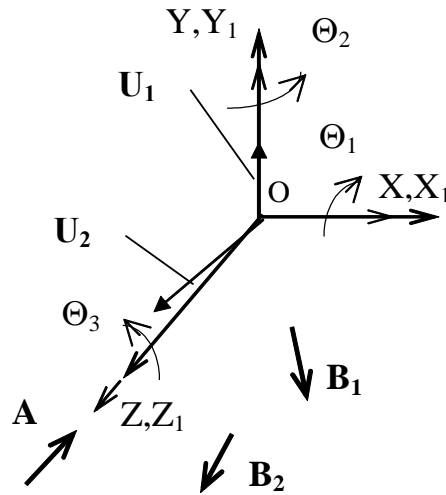


Рис. 4. Положение ортов основного неизменного направления КЭ

Как следует из выражения (2), по координате y_1 реализуется практически независимое измерение угла скручивания Θ_3 при малом влиянии угла Θ_1 . Следовательно, для измерения угла скручивания следует использовать КЭ, эквивалентная зеркальная система которого определяется матрицей вида (11).

Анализ общего алгоритма (6) при подстановке выражения (7) для орта падающего пучка, а также матрицы преобразования координат (12) показывают, что при ориентации основного неизменного направления U_2 эквивалентной зеркальной системы КЭ составляющей малый угол с осью скручивания OZ_1 (U практически параллелен $\|k\|$) (рис. 3) координаты x_2, y_2 орта B_2 отраженного пучка определяются уравнениями:

$$x_2 = (\cos(\omega) - (1)^{k-1}) \cdot (\Theta_2 - \Theta_1 \cdot \Theta_3 \cdot (p-1)) + \sin(\omega) \cdot (\Theta_1 + \Theta_2 \cdot \Theta_3 \cdot (v-1)), \quad (17)$$

$$y_2 = (\cos(\omega) - (1)^{k-1}) \cdot (-\Theta_1 - \Theta_2 \cdot \Theta_3 \cdot (v-1)) + \sin(\omega) \cdot (\Theta_2 - \Theta_1 \cdot \Theta_3 \cdot (p-1)). \quad (18)$$

Из этих выражений следует, что наиболее простой алгоритм измерения реализуется при величинах $\omega = \pi + \Delta$, (Δ – малый угол), $k = 3$. Это также соответствует эквивалентной зеркальной системе в виде триэдра, углы между гранями которого имеют малые отклонения от 90° , но при параметрах $p=1, v=1$ (см. Табл.).

Выражения (17),(18) для координат x_2, y_2 орта B_2 отраженного пучка принимают вид:

$$x_2 = -\Delta \cdot \Theta_1 + (1/2) \cdot \Delta^2 \cdot \Theta_2, \quad (19)$$

$$y_2 = -\Delta \cdot \Theta_2 - (1/2) \cdot \Delta^2 \cdot \Theta_1. \quad (20)$$

Как следует из выражений (19), (20) по координате x_2 реализуется практически независимое измерение коллимационного угла Θ_1 при малом влиянии угла Θ_2 . По координате y_2 измеряется угол Θ_2 с малым влиянием угла Θ_1 .

Теоретический анализ показал, что КЭ для трехкоординатных автоколлимационных измерений должен быть эквивалентен двум зеркальным триэдрам с ортогонально ориентированными векторами основных неизменных направлений, одно из которых совпадает с осью скручивания.

Для уменьшения взаимного влияния измерительных каналов и повышения точности измерения пространственная угловая ориентация КЭ должна определяться как совокупность поворотов относительно координатных осей в последовательности, определяемой параметрами матрицы преобразования координат: $p = 1, v = 1, w = 1$. В соответствии с Табл., оптимальной при автоколлимационных измерениях является последовательность поворотов: на угол Θ_1

(изгиб) относительно оси OX_1 , далее на угол Θ_2 (изгиб) относительно оси OY_1 и затем на угол Θ_3 (кручение) относительно оси OZ_1 .

Исследование отражающего контрольного элемента

Конфигурация контрольного элемента

Проведенный анализ показал, что оптимальная структура КЭ для измерения трех угловых координат включает два эквивалентных зеркальных триэдра с ортогонально расположенными векторами U_1, U_2 основных неизменных направлений (рис. 3).

Такой КЭ может быть реализован в виде стеклянного тетраэдра, двугранные углы между отражающими гранями которого имеют малые отклонения от 90° . При этом в отражателе реализуются различные последовательности отражения пучка от внутренних граней тетраэдра, каждая из которых соответствует одному эквивалентному триэдру с определенной ориентацией вектора основного неизменного направления.

В КЭ с рассматриваемой конфигурацией по отклонениям отраженного пучка с одной последовательностью отражения измеряются коллимационные углы (изгибы), а по другому пучку – угол скручивания (кручение).

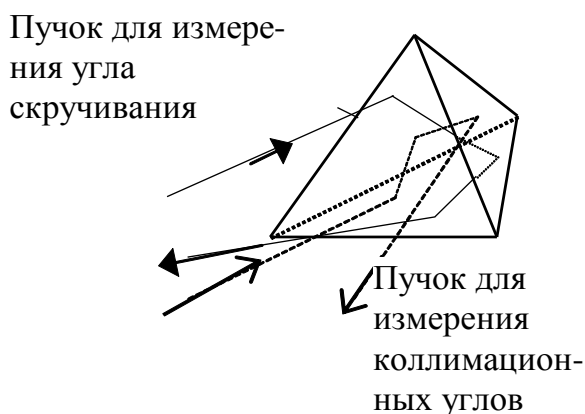


Рис. 5. Контрольный элемент для трехкоординатных автоколлимационных измерений

Физический принцип действия такого отражающего КЭ основан на характерном свойстве правильного тетраэдра: разделении широкого пучка лучей, падающего на входную грань, после трехкратных внутренних отражений, на шесть пучков, соответствующих шести возможным последовательностям отражения.

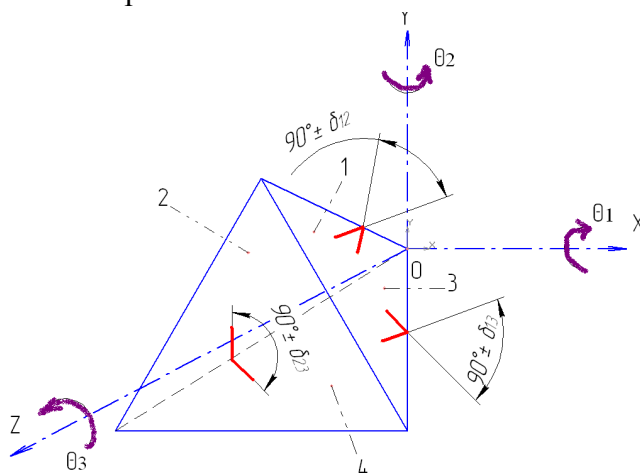


Рис. 6. Параметры тетраэдрического контрольного элемента

Эти три пары отраженных пучков выходят из фронтальной грани под небольшими углами друг к другу и становятся различимы при анализе если внести в прямые двугранные углы между отражающими гранями 1 и 2, 2 и 3, 1 и 3 небольшие отклонения от 90° δ_{12} , δ_{23} , δ_{13} величиной не более $2-3^\circ$ (рис. 6).

В результате действия тетраэдрического КЭ установлено, что орты U_1 и U_2 основных неизменных направлений эквивалентных триэдров занимают требуемое положение (рис. 4) при условиях:

$$\sin(\delta_{12}) \cdot \cos(\delta_{13}) + \sin(\delta_{13}) - \sin(\delta_3) \cdot \cos(\delta_{12}) \cdot \cos(\delta_{13}) = 0, \quad (21)$$

$$\sin(\delta_{13}) + \sin(\delta_{23}) \cdot \cos(\delta_{12}) \cdot \cos(\delta_{13}) = 0, \quad (22)$$

откуда следует следующее соотношение между параметрами тетраэдра:

$$\operatorname{tg}(\delta_{12}) = 2 \cdot \sin(\delta_{23}); \quad 2 \cdot \operatorname{tg}(\delta_{13}) = -\sin(\delta_{12}). \quad (23)$$

Приняв $\delta_2 = \Lambda_1 \cdot \delta_1$, $\delta_3 = \Lambda_2 \cdot \delta_1$, из выражения (23) определяются величины коэффициентов для проектирования КЭ: $\Lambda_1 = 1/2$, $\Lambda_2 = 1/2$ (погрешность приближения при $\delta_1 \leq 3$ не более 1 %).

Алгоритм трехкоординатных измерений при использовании тетраэдрического КЭ

На матричном анализаторе автоколлиматора при использовании КЭ формируются три пары изображений, соответствующих шести отраженным пучкам: осевая пара 1 и 2 и две крайние пары 3 и 4, 5 и 6 соответственно (рис. 6). Как видно, пучки каждой пары симметричны относительно центра плоскости анализа, т.е. имеют равные по величине и противоположные по знаку координаты. На рис. 7 изображен пучок с последовательностью отражения 2–3–1, формирующий изображение 6; пучок с обратной последовательностью 1–3–2 дает изображение 5.

При наличии трехмерных деформаций контролируемого объекта, КЭ поворачивается на три угла Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 , что приводит к смещению изображений. По смещениям центральной пары 1, 2 измеряются коллимационные углы Θ_1 , Θ_2 , по смещениям пары изображений 3, 4 измеряется угол скручивания Θ_3 (третья пара изображений не используется для измерений).

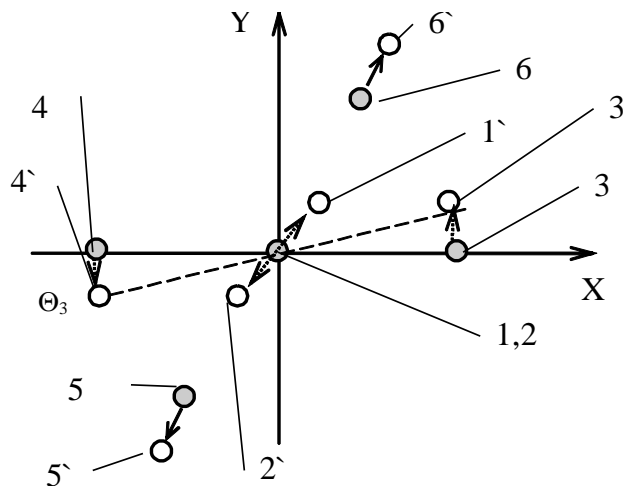


Рис. 6. Изображения марки, сформированные отраженными пучками на матричном анализаторе: 1–6 – до поворота, 1'–6' – после поворота КЭ

Для определения угла скручивания по алгоритму (16) измеряется смещение по оси ОУ изображения 3 (или 4), для измерения коллимационных углов в соответствии с выражениями (19), (20) измеряются по двум координатам смещения изображения 1 (или 2).

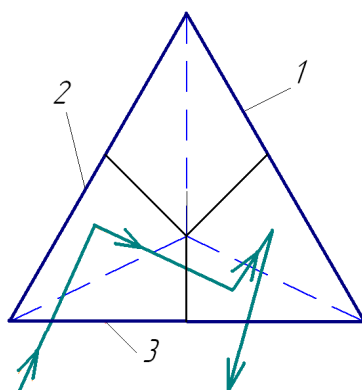


Рис. 7. Последовательность отражений пучка 2–3–1 от граней тетраэдра

В результате углы $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ вычисляются как корни системы нелинейных уравнений:

$$y1/f = -a1 \cdot n \cdot \Theta_3 + (1/2) \cdot a1^2 \cdot n^2 \cdot \Theta_1, \quad (24)$$

$$x2/f = c2 \cdot \Theta_1 + (1/2) \cdot (a2 \cdot n \cdot \Theta_3^2 + a2 \cdot n \cdot \Theta_1^2 + c2^2 \cdot \Theta_2 - a2 \cdot n \cdot c2 \cdot \Theta_3) - a2 \cdot n, \quad (25)$$

$$y2/f = c2 \cdot \Theta_2 - a2 \cdot n \cdot \Theta_3 + (1/2) \cdot (a2^2 \cdot n^2 \cdot \Theta_1) - (1/2) \cdot a2 \cdot n \cdot c2, \quad (26)$$

где f – фокусное расстояние объектива ТОЭА; n – показатель преломления материала КЭ; $a1, a2, c2$ – параметры матрицы действия КЭ, выраженные через составляющие ортов U_1, U_2 основных неизменных направлений эквивалентных зеркальных систем.

Коэффициент редукции КЭ по углу скручивания определяется выражением

$$K_{\Theta_3} = \left(4 \cdot \sqrt{6} / 3\right) \cdot \delta \cdot n. \quad (27)$$

Соответственно коэффициент редукции КЭ по коллимационным углам определяется как

$$K_{\Theta_1, \Theta_2} = \left(4 \cdot \sqrt{3} / 3\right) \cdot \delta. \quad (28)$$

Поскольку величина угла δ не превосходит 3° , коэффициент редукции для поворотов на коллимационные углы (изгибы) имеет требуемую малую величину 0.01–0.2.

В результате исследований найдены соотношения между параметрами конфигурации тетраэдра, позволяющие реализовать КЭ для выполнения трехкоординатных угловых измерений.

Синтезированный КЭ позволяет реализовать малую величину коэффициента оптической редукции по коллимационным углам, что позволяет увеличить дистанцию измерения деформаций до десятков метров [3].

В частности, при $\delta = 2,5^\circ$ коэффициент редукции $K = 0,1$, что в соответствии с выражением (5) определяет дистанцию автоколлимационных измерений в 80 м, что достаточно для измерения деформаций трубопроводов и резервуаров.

Компьютерное моделирование трехкоординатного автоколлиматора

Алгоритм моделирования включает следующие этапы [4]:

- для заданных углов поворота по известным точным выражениям для матриц КЭ и преобразования координат определяются координаты изображений марки на матричном анализаторе;
- генерируется случайная величина, имитирующая изменение параметра измерительной цепи, связанное с влиянием первичной погрешности;

- определяются углы поворота «измеренные» после воздействия влияющего фактора;
- находятся погрешности измерения углов как функции величины влияющего фактора.

Наиболее значимой методической погрешностью является погрешность, вызванная приближениями при использовании алгоритма измерения по выражениям (24) – (26) (рис. 8). Анализ показывает, что в диапазоне измерения угловых координат до 6° , относительная погрешность измерения угла скручивания Θ_2 практически не превосходит 1%, а коллимационных углов Θ_2 , Θ_3 , соответственно, 0,5%.

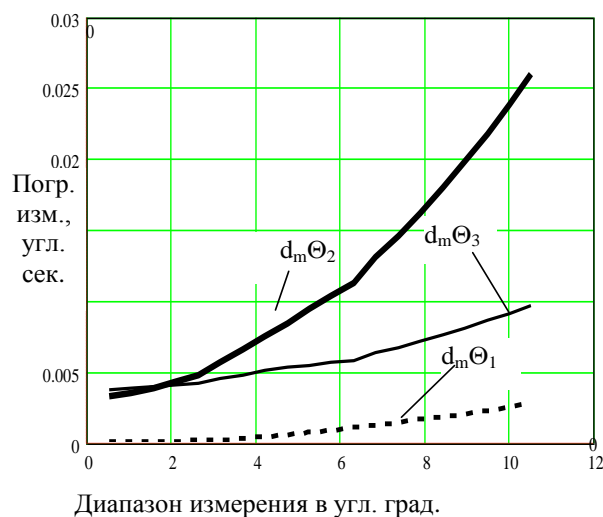


Рис. 8. Методическая погрешность измерения трех угловых координат

Моделирование показало, что к значимой неустранимой погрешности измерения приводят отклонения от номинальных величин параметров δ_1 , δ_2 , δ_3 конфигурации тетраэдрического КЭ. В соответствии с рис. 9, для реализации высокоточных измерений технологический допуск на параметры δ_1 , δ_2 , δ_3 не должен превышать $1''$. Допуски такой величины реализуемы при производстве призмных отражателей.

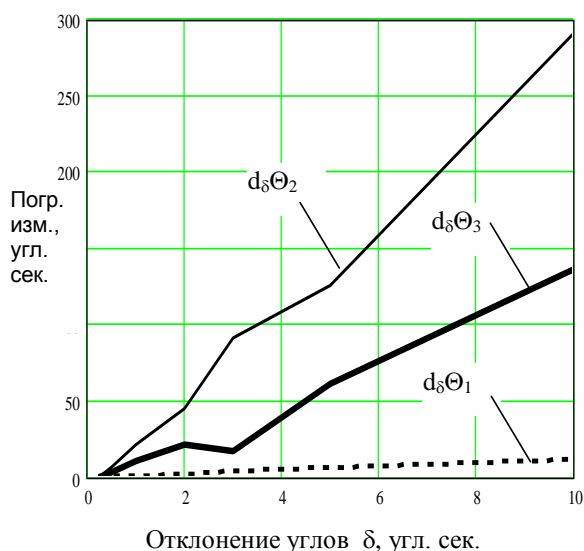


Рис. 9. Погрешность измерения угловых координат вследствие технологических допусков изготовления тетраэдрического КЭ

Компьютерное моделирование выявило, что основные приборные составляющие погрешности измерения вызваны:

- отклонением фокусного расстояния объектива автоколлиматора от номинального значения;
- отклонением показателя преломления стекла КЭ от номинального;
- неточной начальной ориентацией КЭ.

Указанные погрешности являются систематическими и их влияние может быть устранено предварительной калибровкой автоколлимационной системы.

Таким образом показана возможность практической реализации синтезированного КЭ с требуемыми свойствами.

Проектирование экспериментального образца трехкоординатного автоколлиматора

Макет трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора спроектирован с использованием разработанных методик. Изготовлен также тетраэдрический КЭ.

Параметры макета:

- фокусное расстояние объектива автоколлиматора 250 мм при относительном отверстии 1:6;
- марка – полупроводниковый излучающий диод SFH 485 P (Siemens) с мощностью излучения 10 мВт с диафрагмой диаметром 0,3 мм;
- анализатор – КМОП матрица OV5610 Color CMOS QSXGA (5.17 MPixel) с размером пиксела 2,8×2,8 мкм;
- контрольный элемент – стеклянный тетраэдр со световым диаметром 40 мм, углы между отражающими гранями которого имеют отклонения от 90°, рассчитанные по соотношениям (21)–(23) при $\delta_1 = 2,5^\circ$ (рис. 10).

Предварительные эксперименты подтвердили правильность теоретических положений, описывающих функционирование тетраэдрического контрольного элемента для измерения трехкоординатных угловых деформаций автоколлимационным методом.



Рис. 10. Тетраэдрический контрольный элемент для трехкоординатных автоколлимационных измерений

Направления дальнейших исследований

В дальнейшем планируется построение полной физической модели разработанной трехкоординатной углоизмерительной системы (опытного образца). При экспериментальных исследованиях планируется обнаружить соответствие практической погрешности прогнозируемой ее величине, пригодность системы к выполнению заложенных в нее функций,

выявить те или иные несовершенства данного метода с целью его дальнейшей оптимизации и усовершенствования.

Теоретические исследования предполагается продолжить в направлении анализа тетраэдрических контрольных элементов с неплоскими отражающими поверхностями, которые позволят проводить измерения деформаций при взаимном перемещении базового и контролируемого объектов.

Заключение

Цели исследования по тематике гранта в целом достигнуты.

Получены следующие теоретические и практические результаты.

1. Показано, что КЭ для трехкоординатных автоколлимационных измерений пространственных деформаций должен быть эквивалентен двум зеркальным триэдрам с ортогонально ориентированными векторами основных неизменных направлений, одно из которых совпадает с осью скручивания.

2. Для уменьшения взаимного влияния измерительных каналов и повышения точности измерения пространственная угловая ориентация КЭ должна определяться как совокупность поворотов относительно координатных осей в последовательности: сначала на угол Θ_1 (изгиб) относительно оси OX_1 , далее, на угол Θ_2 (изгиб) относительно оси OY_1 и затем – на угол Θ_3 (кручение) относительно оси OZ_1 .

3. Найдены соотношения между параметрами конфигурации тетраэдра, позволяющие реализовать КЭ для практических трехкоординатных угловых измерений.

4. Синтезированный КЭ позволяет достичь небольшой величины коэффициента оптической редукиции по коллимационным углам, что дает возможность увеличить дистанцию измерения деформаций до десятков метров.

В частности, при $\delta = 2,5^\circ$ коэффициент редукиции $K = 0,1$, что в соответствии с выражением (5) определяет дистанцию автоколлимационных измерений в 80 м. Этого достаточно для измерения деформаций трубопроводов и резервуаров.

5. Компьютерное моделирование показало возможность изготовления и практической реализации синтезированного КЭ с требуемыми свойствами для трехкоординатных угловых измерений.

6. Предварительные исследования с разработанным и изготовленным экспериментальным образцом тетраэдрического контрольного элемента подтвердили правильность полученных теоретических положений.

7. Полученные результаты позволяют разработать трехкоординатные оптико-электронные системы измерения деформаций пространственного изгиба и скручивания элементов конструкций объектов в трубопроводном транспорте, промышленности и энергетике.

Публикации

1. Коняхин А.И. О структуре погрешности измерений трехкоординатной автоколлимационной углоизмерительной системы со специальным отражающим элементом // Актуальные теоретические и практические вопросы современного оптико-электронного приборостроения: Сб. трудов молодых ученых ХLI научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО. СПб., 2012. С. 94–95.

2. Konyakhin I.A., Kopylova T.V., Konyakhin A.I. Optic-electronic autocollimation sensor for measurement of the three-axis angular deformation of industry objects. Proc. SPIE 8439, Optical Sensing and Detection II. 2012. <http://dx.doi.org/10.1117/12.922096>.
3. Коняхин А.И. Тенденции развития оптико-электронных автоколлимационных углоизмерительных систем // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2012. С. 113–115.

Литература

1. Konyakhin I.A., Kopylova T.V., Konyakhin A.I. Optic-electronic autocollimation sensor for measurement of the three-axis angular deformation of industry objects. Proc. SPIE 8439, Optical Sensing and Detection II. 2012. <http://dx.doi.org/10.1117/12.922096>.
2. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. Л., 1982. – 128 с.
3. Коняхин А.И. Тенденции развития оптико-электронных автоколлимационных углоизмерительных систем // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2012. С. 113–115.
4. Коняхин А.И. О структуре погрешности измерений трехкоординатной автоколлимационной углоизмерительной системы со специальным отражающим элементом // Актуальные теоретические и практические вопросы современного оптико-электронного приборостроения: Сб. трудов молодых ученых XLI научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО. СПб., 2012. С. 94–95.



Кухтевич Игорь Владимирович
Факультет точной механики и технологий
Кафедра нанотехнологий и материаловедения
E-mail: ba@inbox.ru

МИКРОФЛЮИДНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

И.В. Кухтевич

Научный руководитель – А.А. Евстрапов, заведующий лабораторией информационно-измерительных био- и хемосенсорных микросистем ИАП РАН

Введение

Проведение всех стадий аналитического цикла в одном компактном устройстве – суть концепции «лаборатории на чипе» (lab on a chip). Ее основой является микрофлюидный чип, или микрофлюидное устройство (МФЧ) с функциональными элементами: смесителями, нагревателями, фильтрами, реакционными камерами, устройствами разделения пробы, камерами сбора фракций, сенсорами и т. д. Эти элементы предназначены для выполнения аналитических, технологических и прочих операций с пробой. Применяя данную концепцию к разработке устройств для фиксации и исследования биологических объектов (клеток, бактерий и т. д.) в нативном состоянии, можно создавать компактные аналитические устройства нового

поколения с улучшенными характеристиками (уменьшенным расходом реагентов, улучшенной селективностью, повышенной скоростью проведения анализа и т. д.) для задач биологии, медицины и фармакологии. В свою очередь использование МФЧ совместно с методами микроскопии высокого разрешения (конфокальной лазерной сканирующей, атомно-силовой, микроскопии ближнего поля и др.) позволяет осуществлять исследования биологических объектов с высоким ранее не доступным пространственным разрешением. Таким образом, представляется возможным разработать систему, которая включала бы в себя непосредственно МФЧ, различные интерфейсы и вспомогательные устройства и базировалось бы на одном из методов микроскопии высокого разрешения.

В настоящее время в мире в рамках национальных инициативных проектов, рамочных программ и т. д. проводятся лишь отдельные исследования, направленные на создание систем для фиксации и изучения биологических объектов на основе совмещения микрофлюидных технологий и микроскопии высокого разрешения. Однако есть все основания полагать, что развитие МФЧ в данном направлении позволит разработать и создать новые аналитические и диагностические системы для биологии, медицины и фармакологии.

Помимо этого МФЧ являются востребованными на рынке. По мнению экспертов (<http://www.yole.fr>) рост рынка данных устройств в ближайшие пять лет составит более чем 20 %, в 2016 г. превысит пять миллиардов долларов, продолжая увеличиваться.

Вышесказанное является основанием актуальности и целесообразности выполнения работ по тематике проекта.

Литературный обзор

Системы, которые, как правило, используются для анализа клеток, обладают рядом заметных недостатков. Так, для подготовки пробы необходимы длительное время и достаточно большой объем образца (минимум 10^6 клеток), что накладывает ограничения на возможность анализа образцов, в которых количество анализируемых клеток может быть чрезвычайно мало. Например, циркулирующие клетки опухоли, в случае которых на один образец крови приходится лишь одна клетка. Все это приводит к тому, что цена на коммерчески доступные системы данного типа достаточно велика. Поэтому большая надежда возлагается на системы анализа клеток на основе микрофлюидных технологий, так как они позволяют реализовать весь аналитический протокол в микроформате и получить необходимые данные на основе исследований всего лишь нескольких десятков, а в некоторых случаях единиц клеток.

На текущий момент основными тенденциями МФЧ являются [1–5]:

- а) миниатюризация;
- б) интеграция в МФЧ новых функциональных модулей;
- в) увеличение числа измерительных каналов;
- г) применение наноразмерных элементов и систем;
- д) управление и контроль за всеми стадиями анализа;
- е) увеличение информативности измерений;
- ж) интеграция МФЧ в современные аналитические системы (масс-спектрометры, флуоресцентные микроскопы, конфокальные лазерные сканирующие микроскопы, микроскопы ближнего поля, атомно-силовые микроскопы и др.).

Пример использования МФЧ для фиксации и сортировки циркулирующих клеток опухоли представлен в работе [6]. Авторы создали МФЧ для изолирования и сортировки циркулирующих раковых клеток из крови пациентов, больных опухолями эпителиального происхождения (рис. 1). Чип был химически функционализирован антителами к

специфическим молекулам, находящимся на эпителиальных клетках (anti-epithelial-cell-adhesion-molecule, ЕpСAM). Этим обеспечивалась специфичность захвата клеток опухолей, так как ЕpСAM отсутствуют в клетках крови.

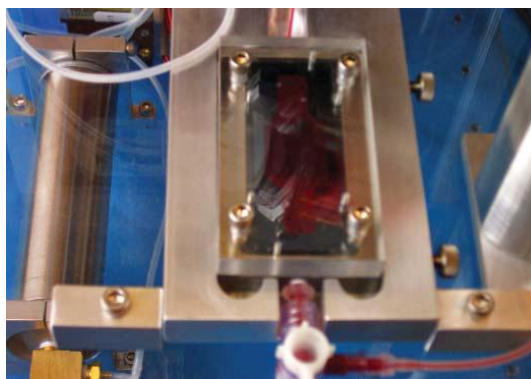


Рис. 1. Микрофлюидный чип для сортировки циркулирующих раковых клеток эпителиального происхождения [6]

Флуоресцентная микроскопия использовалась для подтверждения захвата клеток (рис. 2). Для контроля отделения циркулирующих раковых клеток от клеток крови использовалась окраска клеток конъюгатом красителя родамина с антителами к кератину (компоненту эпителиальных клеток) и FITC с анти-CD45 антителами (присоединяющимися к клеткам крови). Циркулирующие раковые клетки были идентифицированы в 115 из 116 образцов крови. Таким образом, с помощью экспериментальной установки была достигнута точность идентификации более 99 %.

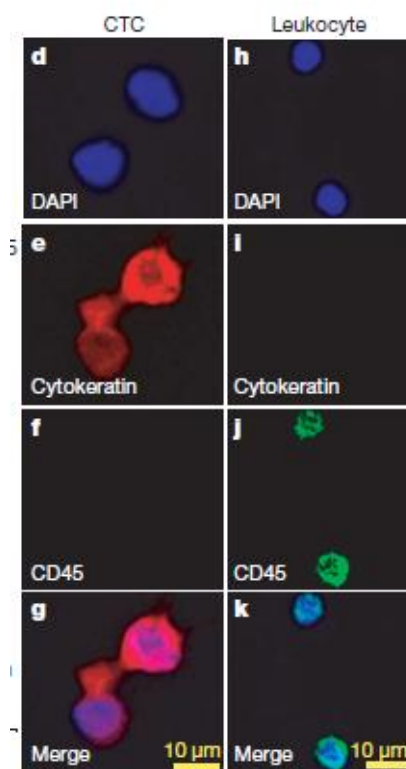


Рис. 2. Окраска циркулирующих клеток опухоли (d-g) и лейкоцитов (h-k) антителами к цитокератину (красный канал) и CD45 (зеленый канал). Синий канал – окраска ядра при помощи DAPI [6]

Изолирование посредством фиксации и сортировка клеток часто используется в лабораториях для клинической диагностики и исследований. Наиболее актуальными областями применения являются выделение лимфоцитов человека из крови для анализа на ВИЧ, изучение стволовых клеток и использование цитосенсоров для обнаружения различных заболеваний [7].

Комбинация микрофлюидных технологий и микроскопии может быть успешно применена для изготовления подобных аналитических платформ. Важным их преимуществом является небольшая стоимость по сравнению с полноразмерными платформами и системами, а также малый размер и портативность. При этом характеристики устройств на основе микрофлюидных технологий не уступают полноразмерным аналогам по точности и скорости проведения анализа [8].

Ключевым моментом является то, что МФЧ могут быть одноразовыми. Это обеспечивает стерильность и возможность безопасной работы с потенциально биологически опасными материалами, например с кровью. Кроме того, устройства на основе МФЧ позволяют существенно снизить объем необходимого образца для анализа, а значит и потребляемое количество реагентов для проведения опыта, заметно уменьшая стоимость анализа [9].

Примером совмещения микрофлюидных технологий и микроскопии высокого разрешения может являться использование чипа для проточной цитометрии. Данный чип состоит из микроканала для транспортировки образца и резервуаров по краям канала, а детектирование осуществляется с помощью фокусирования лазера в микроканале и получения сигнала от клеток с помощью прибора с зарядовой связью или фотоумножителя.

Конструкция такого МФЧ позволяет применять для детектирования методы микроскопии высокого разрешения, такие как конфокальная лазерная сканирующая микроскопия и метод полного внутреннего отражения (TIRF), которые существенно повышают точность и порог детектирования, а также позволяют применять широкий спектр флуоресцентных красителей. Схема подобной системы – микроцитометра – представлена на рис. 3 [10, 11]. Для проведения анализа с его помощью понадобилось всего 20 мкл крови. Микроцитометр укомплектован двумя лазерами (473 и 640 нм), четырьмя независимыми детекторами. Он обладает чувствительностью на уровне коммерчески доступных полноразмерных цитометров.

Возможность изолировать гомогенную и сконцентрированную популяцию клеток из гетерогенной их смеси также важна для получения точной информации о биохимии определенных клеточных типов в смеси. Микрофлюидные технологии делают возможным изолировать малое количество клеток (иногда одиночные клетки) из большой их популяции на основе физических и химических свойств, таких как электрические характеристики или флуоресцентные маркеры. Это позволяет обнаруживать гетерогенности внутри гомогенных популяций клеток [12]

Примером подобного устройства может являться установка, предложенная в работе [13]. Она представляет собой экспериментальную цитометрическую сортирующую микрофлюидную платформу для генетического скрининга сложных фенотипов биологических клеток. Различные подходы позволяют наблюдать и изолировать одиночные мутантные клетки внутри анализируемой популяции. В работе используются преимущества микроскопии и сортировки клеток при помощи потока, для того чтобы совместить уникальные возможности клеточного анализа на одной платформе (рис. 4).

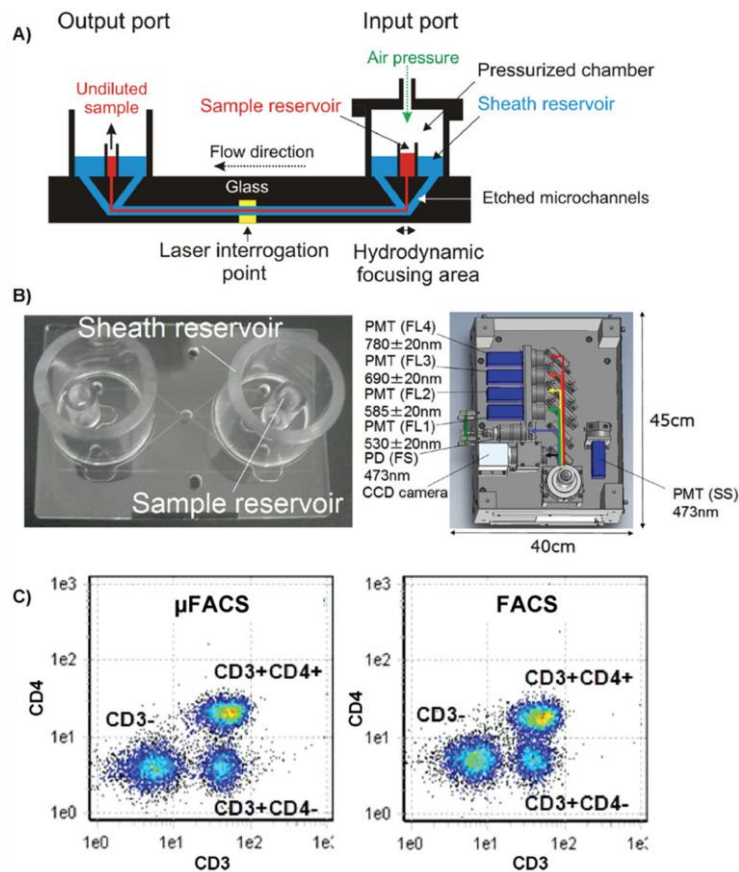


Рис. 3. Микрофлюидный проточный цитометр «Fishman-R»: А – поперечное сечение МФЧ; В – одноразовый МФЧ (слева) и оптическая схема микроцитометра (справа); С – иммунофенотипирование, проведенное на микрофлюидном цитометре «Fishman-R» (слева) и на обыкновенном цитометре (справа) [10, 11]

Микрофлюидная потоковая камера используется для захвата и фиксации клеток с целью последующего анализа методами микроскопии и может быть оптимизирована для захвата одиночных клеток. После анализа интересующих клеток прикладывается радиационное давление от инфракрасного лазерного диода для поднятия клеток из лунок-ловушек в поток. Освобожденные клетки могут быть собраны в конце потока для дальнейшего анализа.

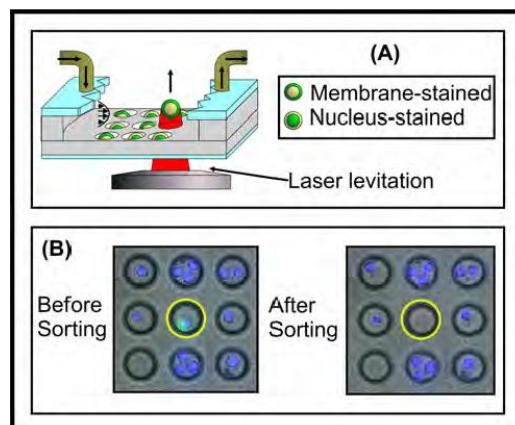


Рис. 4. Оптическая сортировка клеток в микролунках (microwells): А – схема сортировки на основе локализации флуоресценции (ядро или цитоплазма). Одиночные клетки лазером (техника «лазерный пинцет») переносятся в поток жидкости для сбора в конечной части потока; В – часть массива микролунок. Клетка, у которой окрашена мембрана, была исключена из популяции клеток, флуоресцирующих в ядерной области [13]

К методам микроскопии высокого разрешения, с которыми перспективно совмещать МФЧ, следует отнести атомно-силовую микроскопию. Так, некоторые исследователи предлагают использовать открытые микрофлюидные каналы с механическими микроловушками для фиксации одиночных клеток с помощью капиллярных сил (рис. 5) [14]. Таким образом, в каналы обеспечивается свободный доступ зондов для атомно-силовой микроскопии, что позволяет создать прецизионную систему, обеспечивающую получение новых данных о клетках. Выбор размеров открытых каналов позволяет минимизировать емкостные токи утечки при смачивании зонда в капле и в то же время удерживать клетки в их естественной среде на время измерений. Клетки переносятся из загрузочного порта капиллярным потоком и далее задерживаются в микроловушках каналов. Подобные системы позволяют фиксировать множество клеток для исследований без замены чипа.

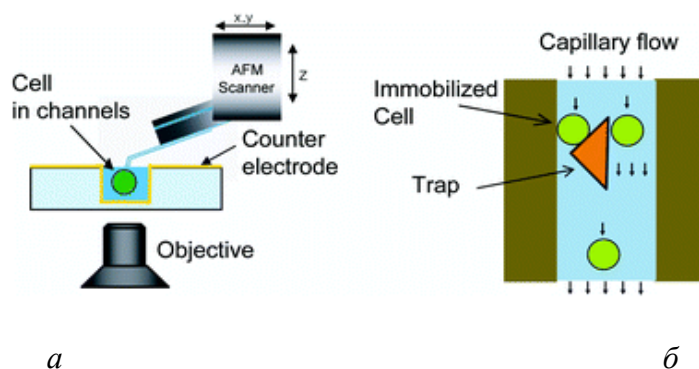


Рис. 5. а – принципиальная схема установки на основе МФЧ с ловушками для фиксации клеток и сканирующей зондовой микроскопии; б – схематическое изображение ловушки в канале МФЧ и принципа фиксации клетки [14]

В статье [15] авторы приводят пример разработанной ими микрофлюидной ячейки совместимой с атомно-силовой микроскопией и силовой спектроскопией. Ячейка была собрана из трех полидиметилсилоксановых частей и зонда. Зонд для атомно-силовой микроскопии был встроен так, что его консоль и наконечник выступают в микрофлюидном канале. Данное устройство предназначено для применения при высоких скоростях сдвига и условии ламинарности потока в водных средах.

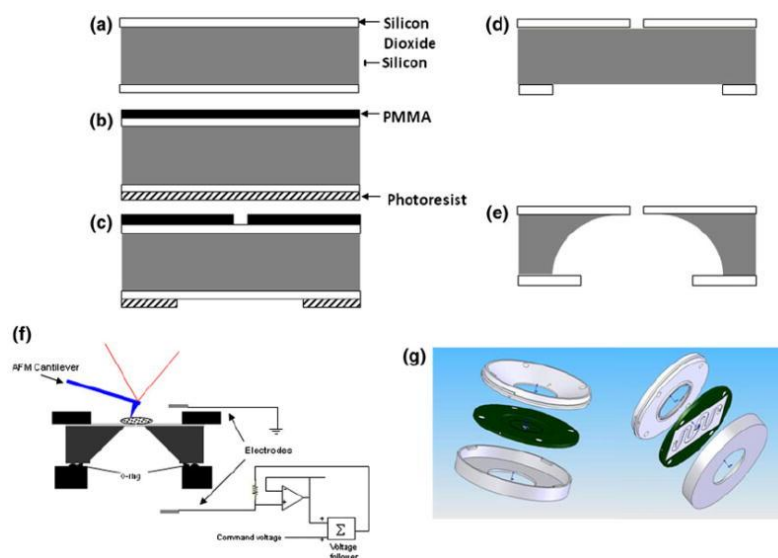


Рис. 6. Стадии изготовления жидкостной ячейки (а-е), сечение жидкостной ячейки с кантилевером (f) и SolidWorks-изображение данной ячейки (g) [16]

В другой статье [16] авторы разработали специальную patch clamp жидкостную ячейку (чип) которая предназначена для использования в сочетании с кантилевером для атомно-силовой микроскопии (рис. 6). Используя данный подход, они составили карту токов, проявляющихся непосредственно при стимулировании клеток кератиноцитов человека (HaCaT) при помощи кантилевера.

Исходя из материала представленного выше, следует, что сейчас существует ограниченное число работ по совмещению микрофлюидных технологий и методов микроскопии высокого разрешения (флуоресцентной, конфокальной лазерной сканирующей, атомно-силовой микроскопии и др.), направленных на разработку систем для анализа биологических объектов (клеток, бактерий и т. д.). Это обуславливает актуальность развития данного направления в рамках проекта.

Разработка и изготовление гидравлического интерфейса и вспомогательного устройства

Во время выполнения кандидатского проекта в 2012 г. для загрузки / слива буферных растворов / проб в МФЧ был разработан и изготовлен гидравлический интерфейс, который также позволяет позиционировать чип на предметном столике конфокального лазерного сканирующего микроскопа TCS SL (Leica, Германия).

Конструкция МФЧ уже была спроектирована и изготовлена в ходе выполнения работ по кандидатскому проекту в 2011 г. Она представляет собой систему резервуаров и микроканалов с областью для формирования гидродинамических ловушек (рис. 7), выполненных в стеклянной подложке (стекло марки «Крон 8»).

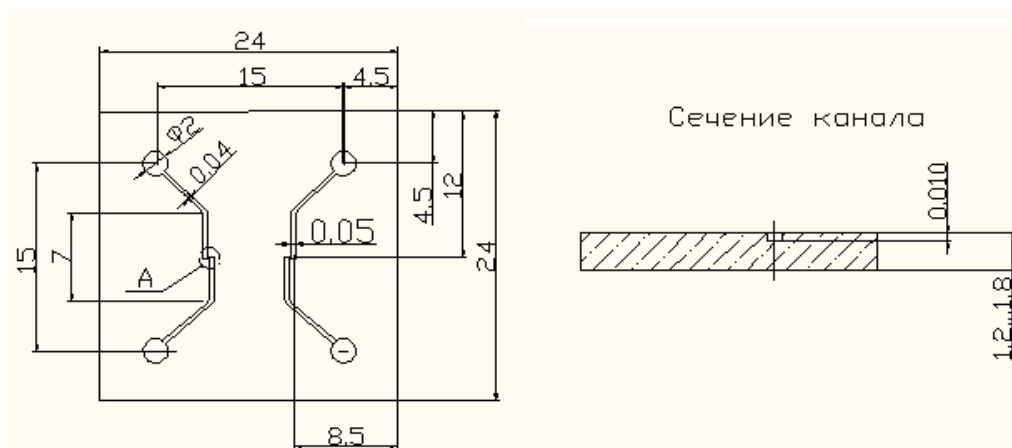


Рис. 7. Чертеж МФЧ с резервуарами, микроканалами и областью для формирования гидродинамических ловушек (обозначена как А), мм

В это же время был выполнен расчет поля профиля скоростей для двух конструкций гидродинамических ловушек (рис. 8): сеть параллельных наноразмерных каналов с заходами; П-образная ловушка с пониженным гидравлическим сопротивлением.

Гидродинамические ловушки, представляющие собой микро- и наноразмерные элементы, изготавливались методом сфокусированного ионного пучка (рис. 9) на электронно-ионном микроскопе «CrossBeam Neon 40» (Carl Zeiss, Германия).

Непосредственно конструкция гидравлического интерфейса и принцип размещения в нем МФЧ, герметизируемого при помощи пленки из полидиметилсилоксана (ПДМС), представлена на рис. 10.

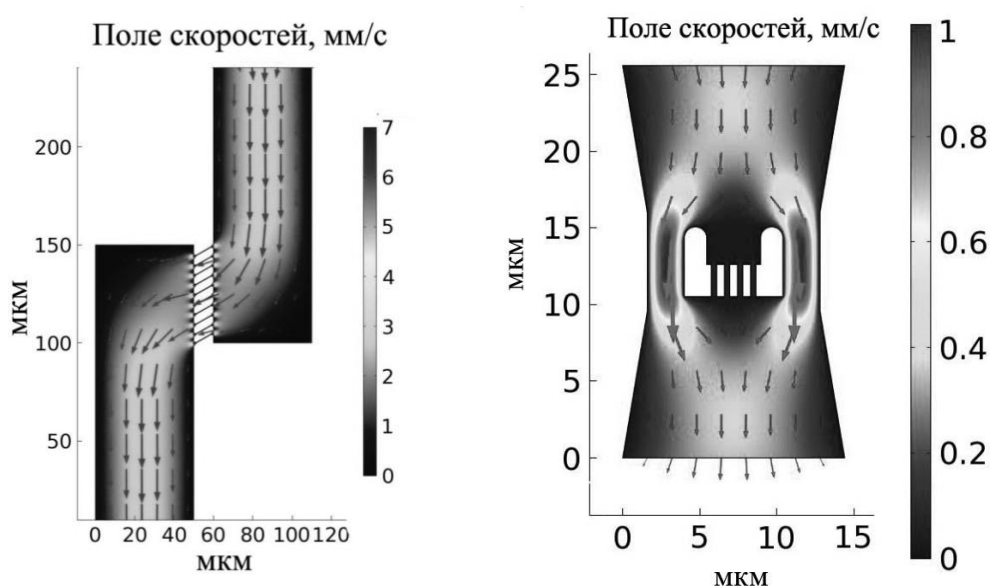


Рис. 8. Профили поля скоростей в различных конструкциях гидродинамических ловушек с каналами: слева – сеть из десяти параллельных наноразмерных каналов с заходами (ширина каналов 250 нм, глубина 2 мкм, длина 8,5 мкм); справа – П-образная ловушка (ширина микроканалов 2,4 мкм, ширина наноразмерных каналов 350 нм, размеры ловушки 3,5x2,45 мкм). Расчет проведен при расходе жидкости 1 нл/с

Для загрузки/слива проб и буферных растворов предполагалось использовать перистальтический насос ВТ100-1F (LongerPump, США), который обладает таким недостатком, как пульсация жидкости в микроканале МФЧ. Поэтому был разработан и изготовлен специальный тройник для устранения этого эффекта. Конструкция данного тройника представлена на рис. 11.

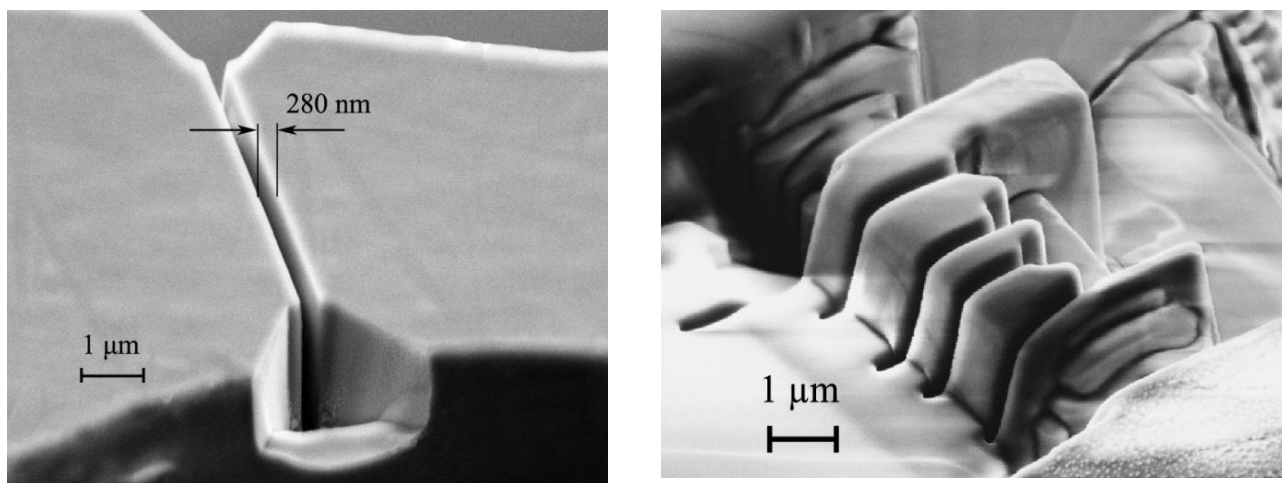
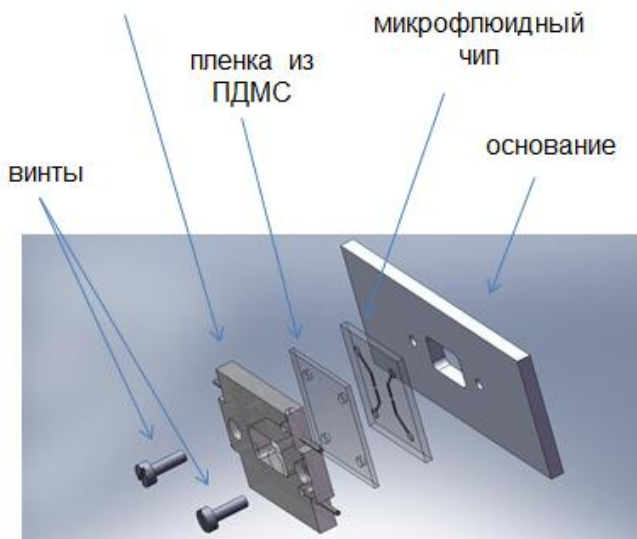
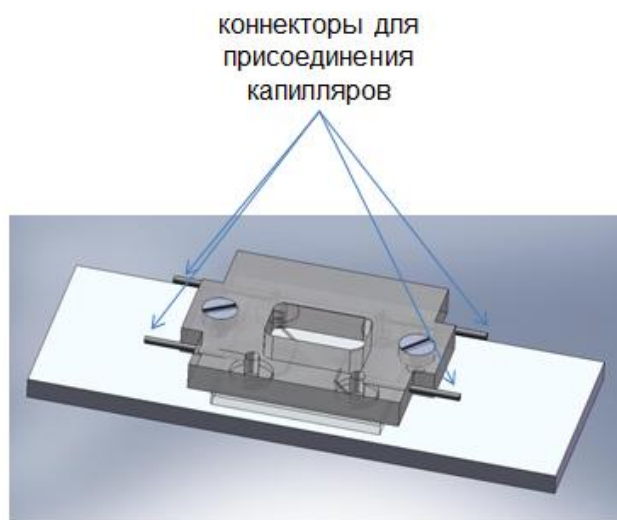


Рис. 9. Изображения, полученные на «CrossBeam Neop 40»: слева – одного из параллельных наноразмерных каналов с заходами; справа – П-образной ловушки с уменьшенным гидравлическим сопротивлением

интерфейс для подачи в каналы
микрофлюидного чипа жидкости



Оправа для подключения перистальтических насосов к микрофлюидному чипу (в разборе)



Микрофлюидный чип в оправе (в сборе)

Рис. 10. Гидравлический интерфейс для МФЧ

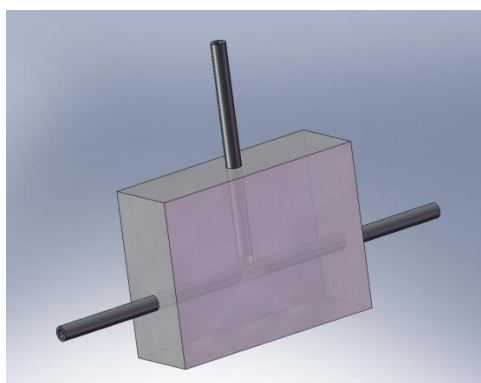


Рис. 11. Тройник для устранения пульсаций жидкости в микроканале МФЧ при использовании перистальтического насоса

Экспериментальная система на основе микрофлюидного чипа и конфокального лазерного сканирующего микроскопа

Был осуществлен сбор экспериментальной системы для проведения испытаний на МФЧ с гидродинамическими ловушками на базе конфокального лазерного сканирующего микроскопа TCS SL. Для загрузки/слива проб и буферных растворов был выбран перистальтический насос ВТ100-1F, который при помощи капилляров подключался к гидравлическому интерфейсу. Общий вид данной установки приведен на рис. 12.

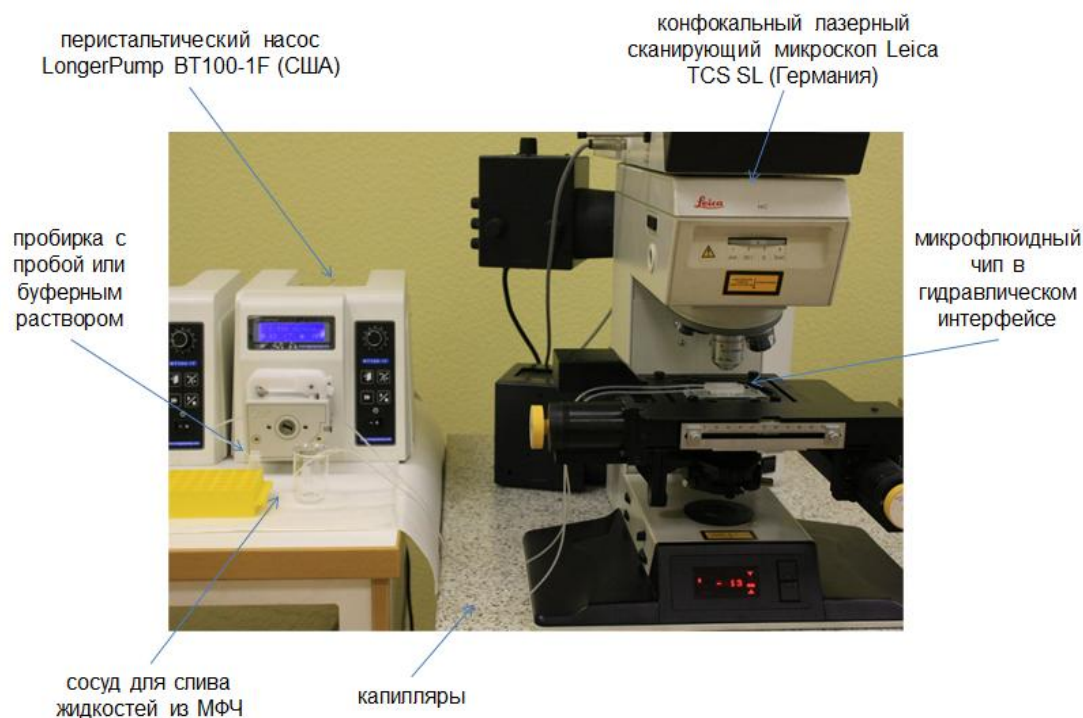


Рис. 12. Экспериментальная система на основе МФЧ и конфокального лазерного сканирующего микроскопа

Испытания экспериментальной системы на основе микрофлюидного чипа и конфокального лазерного сканирующего микроскопа

При помощи собранной экспериментальной системы сначала были проведены исследования по распространению раствора флуоресцеина через ловушки МФЧ (рис. 13), которые показали что в обоих случаях (параллельные наноразмерные каналы с заходами, П-образная ловушка) отчетливо наблюдается протекание раствора через микро- и наноразмерные структуры, однако гидравлическое сопротивление в случае использования П-образной ловушки меньше. Также данное исследование подтвердило совместимость МФЧ с разработанным гидравлическим интерфейсом.

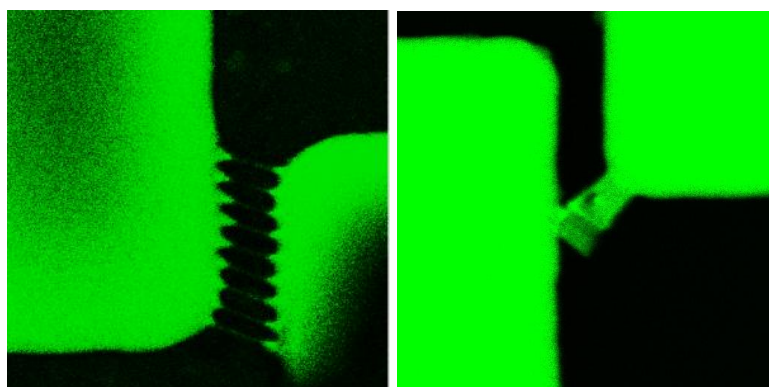


Рис. 13. Изображения распространения раствора флуоресцеина через: слева – параллельные наноразмерные каналы с заходами (размер изображения 100x100 мкм); справа – П-образную ловушку (120x120 мкм). Изображения получены на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе TCS SL в режиме регистрации флуоресценции

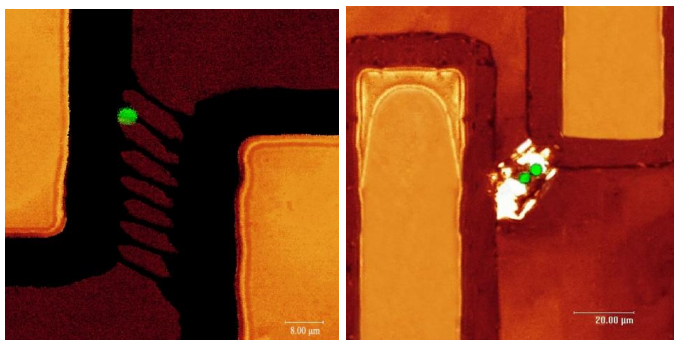


Рис. 14. Изображения фиксации флуоресцентно-меченых микрочастиц размером 3 мкм на: слева – параллельных наноразмерных каналах с заходами (размер изображения 100x100 мкм); справа – П-образной ловушке (120x120 мкм). Изображения получены на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе TCS SL в комбинированном режиме (режим регистрации отраженного света + режим регистрации флуоресценции)

После изучения распространения раствора флуоресцеина в МФЧ были повторно (ранее – в 2011 г. без включения в экспериментальную систему гидравлического интерфейса и насоса) проведены испытания по фиксации флуоресцентно-меченных микрочастиц размером 3 мкм на микро- и наноразмерных структурах (ловушках) МФЧ (рис. 14). Испытания еще раз подтвердили возможность удержания микрочастиц из потока в предложенных конструкциях гидродинамических ловушек, а также совместимость МФЧ с разработанным гидравлическим интерфейсом для проведения данных испытаний.

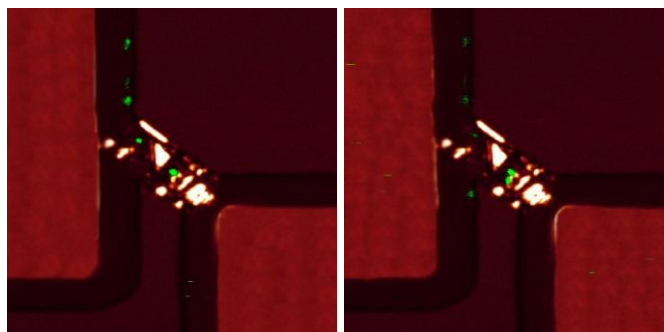


Рис. 15. Изображения (100x100 мкм) фиксации в П-образной ловушке: слева – одной бактерии E. Coli; справа – и двух бактерий E. Coli. Изображения получены на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе TCS SL в комбинированном режиме (режим регистрации отраженного света + режим регистрации флуоресценции)

Затем для подтверждения возможности фиксации непосредственно биологических объектов на МФЧ с П-образной ловушкой, были проведены испытания с использованием флуоресцентно-меченных бактерий E. Coli (рис. 15). Испытания показали возможность удержания реальных биологических объектов, например бактерий E. Coli, из потока в П-образной ловушке, а также совместимость МФЧ с разработанным гидравлическим интерфейсом для постановки подобных испытаний.

Заключение

В рамках выполнения проекта были решены следующие задачи:

- проведен анализ литературных источников, в результате которого выявлены современные тенденции развития МФЧ и рассмотрены вопросы совместимости данных устройств с методами микроскопии высокого разрешения;

- разработан и изготовлен гидравлический интерфейс для загрузки / слива буферных растворов / проб в МФЧ, который также позволяет позиционировать чип на предметном столике конфокального лазерного сканирующего микроскопа;
- разработан и изготовлен специальный тройник для устранения пульсации жидкости в микроканале МФЧ, которая возникает при использовании перистальтического насоса;
- собрана и настроена экспериментальная система на основе МФЧ с гидродинамическими ловушками для фиксации микрообъектов (в том числе биологических объектов) и конфокального лазерного сканирующего микроскопа;
- проведены исследования по распространению раствора флуоресцеина через гидродинамические ловушки (сеть параллельных наноразмерных каналов с заходами, П-образная ловушка) МФЧ, которые показали, что в обоих случаях отчетливо наблюдается протекание раствора через микро- и наноразмерные структуры, но гидравлическое сопротивление в случае использования П-образной ловушки меньше. Также была подтверждена совместимость МФЧ с разработанным гидравлическим интерфейсом;
- проведены испытания по фиксации флуоресцентно-меченных микрочастиц в гидродинамических ловушках МФЧ, которые подтвердили возможность удержания микрочастиц из потока в предложенных конструкциях ловушек, а также совместимость МФЧ с разработанным гидравлическим интерфейсом для проведения схожих испытаний;
- выполнены испытания по фиксации флуоресцентно-меченных бактерий *E. Coli* в П-образной ловушке МФЧ, которые подтвердили возможность удержания реальных биологических объектов из потока в П-образной ловушке, а также совместимость МФЧ с разработанным гидравлическим интерфейсом для постановки подобных испытаний.

Полученные в ходе проделанной работы экспериментальные данные, разработанные устройства и собранная экспериментальная система для проведения испытаний на МФЧ с гидродинамическими ловушками на базе конфокального лазерного сканирующего микроскопа могут использоваться в качестве основы для создания современных диагностических и исследовательских систем / платформ в биологии, фармакологии и медицине.

Публикации

1. Кухтевич И.В., Букатин А.С., Мухин И.С., Евстапов А.А. Микрофлюидные чипы для исследования биологических объектов методами микроскопии высокого разрешения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1. С. 111–115.
2. Evstrapov A.A., Mukhin I.S., Bukatin A.S., Kuhtevich I.V. Ion and electron beam assisted fabrication of nanostructures integrated in microfluidic chips // Nuclear instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms. 2012. Vol. 282. P. 145–148.
3. Кухтевич И.В., Евстапов А.А. Тенденции развития микрофлюидных аналитических систем на чипах для исследования биологических проб // Сб. тезисов II Научно-практической конференции молодых ученых РАН «Фундаментальная и прикладная наука глазами молодых ученых. Успехи, перспективы, проблемы и пути их решения» (Санкт-Петербург, 28–30 мая 2012 г.). СПб., 2012. С. 18–20.
4. Kuhtevich I.V., Bukatin A.S., Chubinskiy-Nadezhdin V.I., Mukhin I.S., Evstrapov A.A. Microfluidic chips with traps for single cell analysis // Proceedings of Microfluidics 2012 (Heidelberg, Germany, 25–27 July 2012). Heidelberg, 2012. P. 153.
5. Кухтевич И.В., Букатин А.С., Мухин И.С., Чубинский-Надеждин В.И., Евстапов А.А. Микрофлюидные чипы с интегрированными микро- и наноразмерными функциональными

элементами для исследования биологических объектов // Сб. тезисов IV Международного Казанского инновационного нанотехнологического форума (Казань, 27–29 ноября 2012 г.) (в печати).

Литература

1. Rivet C., Lee H., Hirsch A., Hamilton S., Lu Hang. Microfluidics for medical diagnostics and biosensors // *Chemical engineering science*. 2011. Vol. 66. P. 1490–1507.
2. Ning Hu, Ye Ai, Shizhi Qian. Field effect control of electrokinetic transport in micro/nanofluidics // *Sensors and actuators*. In: *Chemical*. 2012. Vol. 161. № 1. P. 1150–1167.
3. Le Gac S., van den Berg A. Single cells as experimentation units in lab-on-a-chip devices // *Trends in biotechnology*. 2009. Vol. 28. № 2. P. 55–62.
4. Ray S., Chandra H., Srivastava S. Nanotechniques in proteomics: Current status, promises and challenges // *Biosensors and bioelectronics*. 2010. Vol. 25. № 11. P. 2389–2401.
5. Lin Wang, Paul C. H. Li. Microfluidic DNA microarray analysis: A review // *Analytica Chimica Acta*. 2011. Vol. 687. № 1. P. 12–27.
6. Nagrath S., Sequist L. V., Maheswaran S., Bell D. W., Irimia D., Ulkus L., Smith M.R., Kwak E.L., Digumarthy S., Muzikansky A., Ryan P., Balis U.J., Tompkins R.G., Haber D.A., Toner M. Isolation of rare circulating tumour cells in cancer patients by microchip technology // *Nature*. 2007. Vol. 450. P. 1235–1239.
7. Didar T.F., Tabrizian M. Adhesion based detection, sorting and enrichment of cells in microfluidic Lab-on-Chip devices // *Lab on a chip*. 2010. Vol. 10. P. 3043–3053.
8. Radisic M., Iyer R.K., Murthy S.K. Micro- and nanotechnology in cell separation // *International journal of nanomedicine*. 2006. Vol. 1. № 1. P. 3–14.
9. Godin J., Chen C-H., Cho S.H., Qiao W., Tsai F., Lo Y-H. Microfluidics and photonics for Bio-System-on-a-Chip: A review of advancements in technology towards a microfluidic flow cytometry chip // *Journal of biophotonics*. 2008. Vol. 1. № 5. P. 355–376.
10. Takeda K., Jimma F. Maintenance free biosafety flowcytometer using disposable microfluidic chip (FISHMAN-R) // *Cytometry Part B: Clinical Cytometry*. 2009. Vol. 76B. P. 405–406.
11. Takao M., Jimma F., Takeda K. Expanded applications of new-designed microfluidic flow cytometer (FISHMAN-R) // *Cytometry Part B: Clinical Cytometry*. 2009. Vol. 76B. P. 405.
12. El-Ali J., Sorger P.K., Jensen K.F. Cells on chips. Nature insight // *Lab on a chip*. 2006. Vol. 442. № 7101. P. 367–418.
13. Desai S., Kovac J., Mittal N., Taff B., Voldman J. Microfabricated devices for sorting cells using complex phenotypes // *Biological and chemical MEMS*. 2007. P. 40.
14. Ryu W.H., Huang Z., Park J.S., Moseley J., Grossman A.R., Fasching R.J., Prinz F.B. Open micro-fluidic system for atomic force microscopy-guided in situ electrochemical probing of a single cell // *Lab on a chip*. 2008. Vol. 8. P. 1460–1467.
15. Schoenwald K., Peng Z. C., Noga D., Qiu S. R., Sulchek T. Integration of atomic force microscopy and a microfluidic liquid cell for aqueous imaging and force spectroscopy // *Review of scientific instrumentation*. 2010. Vol. 81.
16. Upadhye K.V., Candiello J.E., Davidson L.A., Lin H. Whole-cell electrical activity under direct mechanical stimulus by AFM cantilever using planar patch clamp chip approach // *Cellular and molecular bioengineering*. 2011. Vol. 4. № 2. P. 270–280.



Лапшина Надежда Сергеевна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: n.lapshina@phoi.ifmo.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПЛАЗМОННЫХ НАНОАНТЕНН ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОВЫМИ ПОТОКАМИ НА НАНОМАСШТАБАХ

Н.С. Лапшина

Научный руководитель – доктор физико-математических наук П.А. Белов

Введение

Проблема управления светом на наномасштабах является одной из центральных в современной оптике. Обычные оптические компоненты не способны манипулировать светом на масштабах много меньше оптической длины волны. Один из подходов к решению этой фундаментальной задачи основан на использовании наноантенн.

Оптическая наноантенна – это устройство для преобразования спектральных и угловых характеристик оптического излучения на наномасштабах. Большой интерес к наноантеннам обусловлен тем, что они способны играть роль эффективного посредника между наноизлучателями (атомами, молекулами) и свободно распространяющимся светом. Достигается это за счет резонансов той или иной природы и может быть использовано в большом количестве приложений, включающих химические и биологические сенсоры, солнечные батареи, системы сверхбыстрой обработки информации и т. д. [1]. Однако во многих случаях важна возможность активного контроля над диаграммой направленности излучения наноантенн и ее перестраиваемость.

Предложенные к настоящему времени методы управления характеристиками наноантенн основаны преимущественно на возможности переключения между различными модовыми режимами их работы посредством механического изменения конфигурации структуры, а также варьирования частоты [2, 3, 4, 5]. Однако все они обладают определенными недостатками, такими как относительно медленное время отклика и ухудшение направленности излучения при изменении параметров системы.

Поэтому поиск новых механизмов перестраиваемости как спектральных, так и угловых характеристик наноантенн представляет собой актуальное и многообещающее направление исследований в нанофотонике. Интересные возможности дает использование нелинейного отклика отдельных компонентов наноантенн. Было показано, что собственная нелинейность металлических частиц может быть использована для создания сверхчувствительных химических и биологических сенсоров, а также для активного ультрабыстрого контроля над диаграммой направленности рассеяния наноантенн [6]. Однако богатая разнообразными эффектами физика нелинейных наноантенн пока остается плохо исследованной.

Теоретические исследования нелинейных плазмонных наноантенн

Модель нелинейной плазмонной наноантенны

В настоящей работе рассматривается наноантенна, состоящая из пары сферических наночастиц, близко расположенных друг к другу и помещенных в кварц с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_h = 2,15$. Допустим, что частицы одинаковые с радиусом $a = 10$ нм, а

расстояние между их центрами составляет $d = 30$ нм (см. вкладку на рис. 1). Поскольку выполняется соотношение $a = d \leq 1/3$, то данную систему можно описывать в дипольном приближении [6]. Полагая, что наночастицы сделаны из серебра и обладают Керровским нелинейным откликом, нелинейность можно ввести через диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon_{Ag}^{NL} = \varepsilon_{Ag}^L + \chi^{(3)} |E_{1,2}^{(in)}|^2.$$

Здесь линейная часть описывается формулой Друде:

$$\varepsilon_{Ag}^{NL} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{[\omega(\omega - i\nu)]},$$

где $\varepsilon_{\infty} = 4,96$, $\hbar\omega_p = 9,54\text{эВ}$, $\hbar\nu = 0,055\text{эВ}$ [7], $|E_{1,2}^{(in)}|$ – локальное поле внутри отдельной частицы. Для серебряных частиц сферической формы с радиусом 10 нм согласно [8] кубическая восприимчивость равна $\chi^{(3)} = 3 \times 10^{-9}$ ед.СГС, что на много больше кубической нелинейности кварца (10^{-15} ед. СГС) [9], которой мы пренебрегаем. Цель данного исследования состоит в том, чтобы изучить временную мутацию индикатриссы рассеяния такой нелинейной димерной наноантенны при условии развития модуляционной неустойчивости.

На рассматриваемый димер падает плоская электромагнитная волна (см. вкладку на рис. 1) с частотой, близкой к частоте поверхностного плазменного резонанса отдельной наночастицы. Динамический отклик такой системы характеризуется изменением во времени медленных амплитуд поляризаций каждого шарика.

Для того чтобы получить систему нелинейных связанных уравнений для медленных амплитуд поляризаций, используется недавно предложенная модель для изучения сильно локализованных мод в цепочке наночастиц сферической формы [10]. Подробный вывод основных уравнений, необходимых для дальнейшего численного и имитационного моделирования, приведен в работе [11].

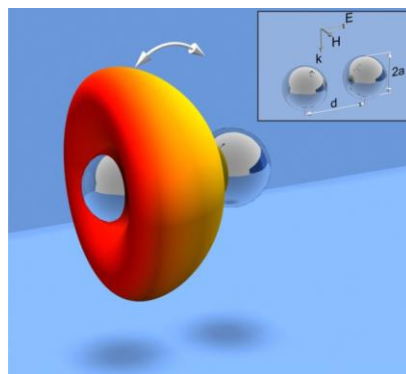


Рис. 1. Схематическое изображение индикатриссы рассеяния наноантенны. На вкладке показаны структура, параметры и направление падающей плоской волны

Используя стандартную технику [12], можно провести анализ устойчивости состояний равновесия рассматриваемой системы и получить выражение для инкремента неустойчивости [11]. Состояния равновесия становятся неустойчивыми в случае, если инкремент положительный. Ситуация, когда инкремент неустойчивости равен нулю, соответствует области модуляционной неустойчивости на плоскости параметров $(\Omega; E_0^2)$, как показано на рис. 2. Модуляционная неустойчивость охватывает всю верхнюю часть области бистабильности и распространяется гораздо дальше (см. вкладку на рис. 2).

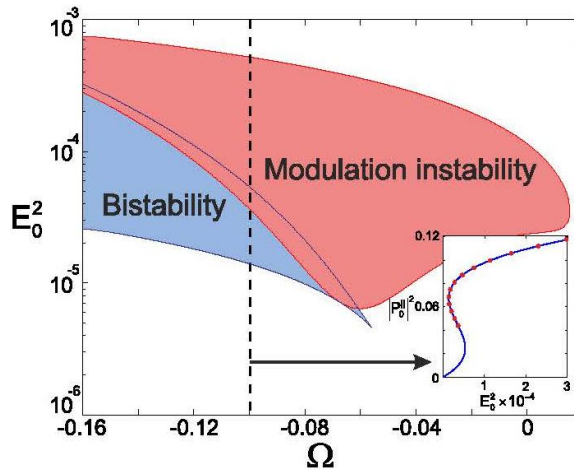


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма на плоскости параметров $(\Omega; E_0^2)$ с отмеченными областями бистабильности и модуляционной неустойчивости

Результаты численного и имитационного моделирования

Для того чтобы исследовать поведение нелинейной системы после развития неустойчивости, основные уравнения [11] были решены численно для фиксированного значения относительной расстройки частоты от резонансного значения, равного 0,12. Внешнее поле E принимается медленно возрастающим до значения насыщения $E_{sat} = 0,014$, соответствующего развитию модуляционной неустойчивости. Результаты представлены на рис. 3, на котором показано, что модуляционная неустойчивость ведет к спонтанному возбуждению асимметричной собственной моды димера. Это, в свою очередь, приводит к динамическому обмену энергией между собственными модами системы (симметричной и асимметричной).

Для слабого внешнего электрического поля поляризации частиц совпадают, что соответствует состоянию равновесия типа фокус на фазовой плоскости. Когда поле E достигает значения, достаточного для развития модуляционной неустойчивости, данное состояние становится неустойчивым и на фазовой плоскости появляются два предельных цикла (рис. 3).

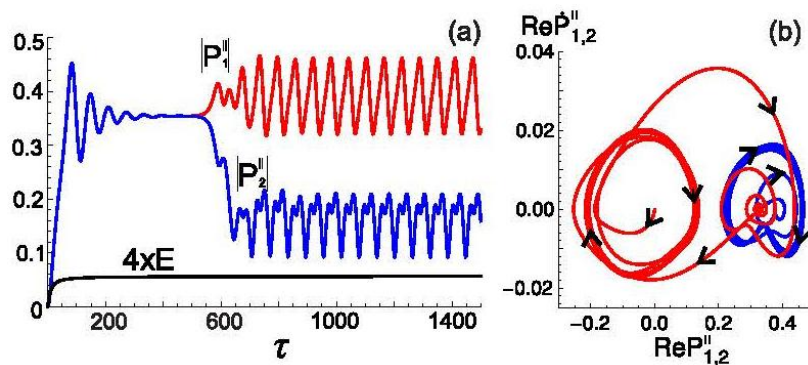


Рис. 3. Модуляционная неустойчивость: а – временная зависимость поляризаций первой (красная кривая) и второй (синяя кривая) частиц, когда внешнее поле E (черная кривая) медленно достигает значения, необходимого для развития модуляционной неустойчивости; б – фазовые траектории, соответствующие динамике, показанной на рис. 3а

Модуляционная неустойчивость приводит к фазовой рассинхронизации между дипольными моментами частиц и внешним электрическим полем, а также к модуляции сечения рассеяния наноантенны и периодическому вращению индикатриссы рассеяния (рис. 4а, 4б). Период вращения составляет 90 фс, а отношение максимально значения сечения

рассеяния к минимальному равно 18. Эта модуляция намного более быстрая, чем типичные случаи, описанные ранее для плазмонных антенн [13].

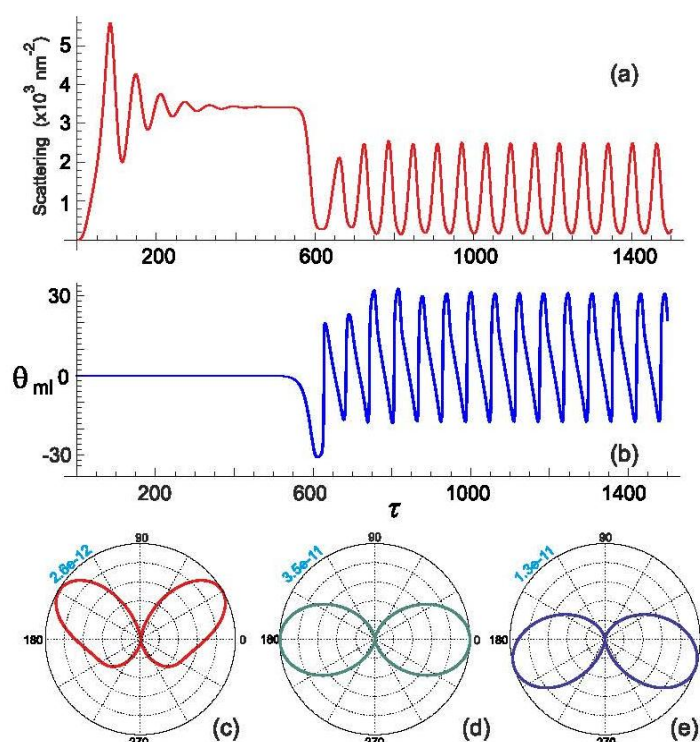


Рис. 4. Временная зависимость: *a* – сечения рассеяния, *b* – осциллирующего угла, соответствующего повороту главного лепестка индикатриссы рассеяния; *c-e* – моментальные снимки диаграммы рассеяния, сделанные в разные моменты времени

Угол сканирующего сектора индикатриссы рассеяния является относительно широким и примерно равен 50° . Однако использование такого нанорадара на практике может потребовать гораздо большей направленности, чем в случае с нанодимером. Одним из путей решения этой проблемы может служить использование в качестве директора диэлектрической сферы с большой диэлектрической проницаемостью [2].

Амплитуда насыщения электрического поля соответствует интенсивности, равной $21,6 \text{ МВт/см}^2$. Такая большая энергия поля, освещающего систему, может привести к тепловому разрушению димера. Чтобы оценить максимально возможную длительность импульса накачки, используется известное значение порога разрушения $3,96 \text{ Дж/см}^2$. Оно получено экспериментально для серебряных частиц, погруженных в кварц, для пикосекундного режима освещения [14]. Принимая во внимание увеличение электрического поля внутри серебряной наночастицы благодаря поверхностному плазмонному резонансу, можно оценить максимальную длительность импульса в $0,5 \text{ нс}$, что на много больше характерного периода осцилляций. Таким образом, в дальнейшем можно будет экспериментально наблюдать периодическое вращение индикатриссы рассеяния такого нанорадара.

Области возможного использования

Уникальные свойства наноантенн делают их привлекательными для применения в оптических сенсорах, солнечных батареях, квантовых коммуникационных системах, молекулярной спектроскопии и т. п. [15, 16]. Таким образом, изучение оптических наноантенн представляет собой многообещающее направление исследований, полностью соответствующее

современным тенденциям развития науки, и отвечает мировому уровню. Предлагаемый в данном проекте «нанорадар» может использоваться в системах динамического позиционирования наноцелей, таких как молекулы, протеины, вирусы, а также в сверхбыстрых нанофотонных устройствах.

Заключение

Предложена абсолютно новая концепция активного контроля направленности и перестраиваемости оптических плазмонных наноантенн. Показано, что модуляционная неустойчивость в нелинейном плазмонном димере может привести к динамическому обмену энергией между собственными модами системы. Это вызовет периодическое вращение диаграммы рассеяния такой наноантенны. В дальнейшем будет проведена оптимизация системы путем изменения дизайна наноантенны. Это могут быть высоконаправленные антенны типа Яги-Уда [1] или металлодиэлектрические структуры [2]. Также будет исследовано влияние угла падения плоской оптической волны, интенсивности электрического поля и его частоты на поведение направленности наноантенн.

Публикации

1. Lapshina N.S., Noskov R.E., Kivshar Yu.S. Nanoradar based on nonlinear dimer Nanoantenna // Opt. Lett. 37, 3921. 2012.
2. Lapshina N.S., Noskov R.E., Kivshar Yu.S. Nanoradar // Abstracts of PIERS. Moscow, Russia, 19-23 August, 2012. p. 204.

Литература

1. Biagioni P., Huang J., Hecht B. Nanoantennas for visible and infrared radiation // Reports on progress in physics. 2012. Vol. 75. P. 024402.
2. Devilez A., Stout B., Bonod N. Compact metallo-dielectric optical antenna for ultra directional and enhanced radiative emission // ACS Nano. 2010. Vol. 4. P. 3390.
3. Krasnok A.E., Miroshnichenko A.E., Belov P.A., Kivshar Y.S. Huygens optical elements and Yagi – Uda nanoantennas based on dielectric nanoparticles // JETP Letters. 2011. Vol. 94. P. 593.
4. Bonod N., Devilez A., Rolly B. et al. Ultracompact and unidirectional metallic antennas // Physical Review B. 2010. Vol. 82. P. 115429.
5. Shegai T., Chen S., Miljković V. et al. A bimetallic nanoantenna for directional colour routing // Nature communications. 2011. Vol. 2. P. 481.
6. Noskov R.E., Krasnok A.E., Kivshar Y.S. Nonlinear metal-dielectric nanoantennas for light switching and routing // New journal of physics. 2012. Vol. 14. P. 093005.
7. Romero I., Aizpurua J., Bryant G.W., de Abajo F.J.G. Plasmons in nearly touching metallic nanoparticles: Singular response in the limit of touching dimmers // Optics express. 2006. Vol. 14. P. 9988.
8. Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of the noble metals // Physical Review B. 1972. Vol. 6. P. 4370.
9. Drachev V.P., Buin A.K., Nakotte H., Shalaev V.M. Size dependent $\chi^{(3)}$ for conduction electrons in Ag nanoparticles // Nano Letters. 2004. Vol. 4. P. 1535.
10. Weber M.J. Handbook of optical materials. CRC PRESS, 2003.
11. Lapshina N.S., Noskov R.E., Kivshar Yu.S. Nanoradar based on nonlinear dimer nanoantenna // Optics Letters. 2012. Vol. 37. P. 3921.

12. Noskov R.E., Belov P.A., Kivshar Y.S. Subwavelength modulational instability and plasmon oscillons in nanoparticle arrays // Physical Review Letters. 2012. Vol. 108. P. 093901.
13. Rabinovich M.I., Trubetskov D.I. Oscillations and waves in linear and nonlinear systems. Dordrecht, 1989.
14. Abb M., Albella P., Aizpurua J., Muskens O. L. All-optical control of a single plasmonic nanoantenna-ITO hybrid // Nano Letters. 2011. Vol. 11. P. 2457.
15. Torres-Torres C., Peréa-López N., Reyes-Esqueda J.A. et al. Ablation and optical third-order nonlinearities in Ag nanoparticles // International journal of nanomedicine. 2010. Vol. 5. P. 925.
16. Bharadwaj P., Deutsch B., Novotny L. Optical antennas // Advances in optics and photonics. 2009. Vol. 1. P. 438.



Мараев Антон Андреевич
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: antoshka87@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАВНОСИГНАЛЬНОЙ ЗОНЫ С ПОМОЩЬЮ RGB-СВЕТОДИОДОВ

А.А. Мараев

Научный руководитель – доцент А.Н. Тимофеев

Введение

В настоящее время оптико-электронные методы контроля смещения и позиционирования находят все большее применение в решении задач при монтаже крупногабаритных объектов и строительных работах. Они обеспечивают высокую точность определения положения контролируемых объектов при работе на больших расстояниях.

Среди существующих приборов для позиционирования относительно базовой плоскости рабочих органов машин, выполняющих земельные работы, на кафедре ОЭПиС НИУ ИТМО реализована оптико-электронная система ПУЛ-Н с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ), выполненная как насадка на теодолит [1]. Система состоит из передающей части – задатчика базовой плоскости (ЗБП) – и приемной части, положение которой определяется относительно этой базовой плоскости.

На точность определения положения приемного устройства ПУЛ-Н наибольшее влияние оказывает вертикальный градиент температуры. Расчетное максимальное значение этой погрешности на 100 м составляет 5,5 мм.

Цели и задачи

Цель работы – ослабление влияния вертикального градиента температуры воздушного тракта на измерения линейных смещений при помощи оптико-электронной системы позиционирования относительно базовой плоскости с полихроматической ОРСЗ.

Для решения проблемы был предложен полихроматический (в частном случае двухволновой) дисперсионный метод [2]. Он позволяет измерить воздействие внешних факторов на положение базовой плоскости ОРСЗ, создаваемой излучением с разными длинами волн, и затем скорректировать его при позиционировании приемной части.

Для реализации полихроматической ОРСЗ предположено установить источники с двумя разными длинами волн в один излучающий блок, то есть использовать общие оптические элементы для формирования равносигнальной зоны (разделительной призмы и объектива). В связи с этим частными задачами являются:

- исследование источников излучения, применение которых возможно для создания полихроматической ОРСЗ и параметров RGB-светодиодов;
- оптимизация оптической схемы в соответствии с требованиями для работы на нескольких длинах волн;
- исследование распределения облученности в месте приема и особенностей обработки получаемого сигнала.

Оптическая равносигнальная зона

Системы с оптической равносигнальной зоной предназначены для контроля поперечного смещения объекта.

ОРСЗ создается благодаря тому, что излучающий блок формирует в пространстве предметов несколько пересекающихся полей оптического излучения, созданных, например, двумя полупроводниковыми излучающими диодами (рис. 1). Входящая в состав приемного блока приемная часть имеет одно оптическое угловое или линейное поле для анализа своего положения в полях излучения.

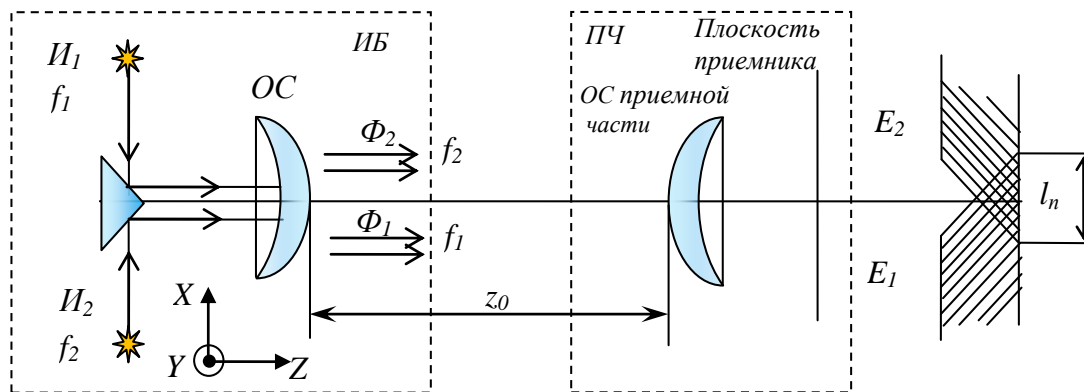


Рис. 1. Построение ОРСЗ. I_1, I_2 – источники излучения; f_1, f_2 – частота модуляции источников; Φ_1, Φ_2 – световой поток; E_1, E_2 – облученность, создаваемая на приемнике; l_n – переходная зона; z_0 – дистанция фокусировки

Наибольшее влияние на результат определения положения приемного устройства в таких системах вносит рефракция воздушного тракта. Для ее устранения был предложен двухволновой дисперсионный метод [2]. Он базируется на использовании разностного сигнала, полученного от источников излучения с различными длинами волн.

Реализация двухволнового метода становится возможной благодаря тому, что в оптической равносигнальной зоне информация о смещении относительно базы содержится в величине основного информативного параметра. В большинстве случаев им является глубина модуляции излучения [3]. Следовательно, применяя необходимую модуляцию излучения двух

пар источников, создающих ОРСЗ, и используя в электронных схемах обработки сигналов синхронное детектирование, можно успешно осуществлять двухспектральные измерения.

Чувствительность к поперечным смещениям фотоприемной части оптико-электронной системы с ОРСЗ, формируемой задатчиком базовой плоскости (ЗБП), обуславливается энергетической чувствительностью, которая определяется как отношение разностного потока $d\Phi(x + dx, y, z, \lambda)$ к соответствующему малому линейному смещению dx с учетом спектрального состава излучения однотипных источников в полосе длин волн $\Delta\lambda$ (от λ_1 до λ_2). Выражение, определяющее энергетическую чувствительность $W(x + dx, y, z, \lambda)$ в ОЭС, будет иметь вид:

$$W(x + dx, y, z, \lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_1(x + dx, y, z, \lambda) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_2(x + dx, y, z, \lambda) d\lambda}{dx}. \quad (1)$$

Максимальная энергетическая чувствительность в ОРСЗ на дистанции, требуемой при работе системы, достигается фокусированием объектива ЗБП на эту дистанцию (то есть на этом расстоянии находится плоскость фокусировки ЗБП).

При одинаковом распределении спектральной яркости источников энергетическую чувствительность можно определить выражением для круглых или квадратных зрачков оптической системы ЗБП и фотоприемной части (ФПЧ):

$$W(z, \lambda) = \frac{2\pi S_{ЗБП} S_{ПЧ}}{z^2} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{амм}(\lambda) \tau_{ОС}(\lambda) L_e(\lambda) z_0(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) z_0(\lambda) z + D_{ЗБП} |z_0(\lambda) - z|} d\lambda, \quad (2)$$

где $L_e(\lambda)$ – функция спектральной плотности энергетической яркости источника оптического излучения, $D_{ЗБП}$ – диаметр выходного зрачка объектива ЗБП; z – расстояние между ЗБП и ФПЧ, $z_0(\lambda)$ – дистанция фокусировки ЗБП, здесь λ_1, λ_2 – границы спектра источников излучения в канале.

С учетом спектральной чувствительности фотоприемника, эффективное значение энергетической чувствительности будет выражено:

$$W_{эфф} = \frac{2\pi S_{ЗБП} S_{ПЧ}}{z^2} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{амм}(\lambda) \tau_{ОС}(\lambda) L_e(\lambda) z_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) z_0(\lambda) z + D_{ЗБП} |z_0(\lambda) - z|} d\lambda, \quad (3)$$

где $s(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприемника ФПЧ.

Эффективная чувствительность системы к смещению учитывает спектральную характеристику приемника, таким образом она характеризует коэффициент полезного действия преобразований оптических сигналов и поэтому должна быть определяющей при выборе параметров системы.

Для полихроматической ОРСЗ, например, образованной двумя каналами, суммарная эффективная энергетическая чувствительность будет:

$$W_{эфф\Sigma} = W_{эфф1} + W_{эфф2} = \frac{2\pi S_{ЗБП} S_{ПЧ}}{z^2} \cdot \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{амм}(\lambda) \tau_{ОС}(\lambda) l_{e1}(\lambda) z_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) z_0(\lambda) z + D_{ЗБП} |z_0(\lambda) - z|} d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{\tau_{амм}(\lambda) \tau_{ОС}(\lambda) l_{e2}(\lambda) z_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) z_0(\lambda) z + D_{ЗБП} |z_0(\lambda) - z|} d\lambda \right), \quad (4)$$

где (λ_1, λ_2) , (λ_3, λ_4) – диапазоны оптического излучения источников первого и второго каналов соответственно.

Для равноточного определения отклонений ФПЧ, образованных в полихроматической ОРСЗ двумя каналами в разных диапазонах длин волн $(\lambda_1 - \lambda_2)$ и $(\lambda_3 - \lambda_4)$ требуется, чтобы энергетическая чувствительность была одинаковой в каждом канале, то есть $W_{\text{эф1}} = W_{\text{эф2}}$. Так как для двух каналов величины $S_{\text{ЗБП}}$, $S_{\text{ПЧ}}$, $D_{\text{ЗБП}}$, z будут иметь одинаковые значения то, с учетом этого получаем:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{амм}}(\lambda)\tau_{\text{ОС}}(\lambda)L_{e1}(\lambda)z_0(\lambda)s(\lambda)}{k(\lambda)\delta\varphi(\lambda)z_0(\lambda)z + D_{\text{ЗБП}}|z_0(\lambda) - z|} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{амм}}(\lambda)\tau_{\text{ОС}}(\lambda)L_{e2}(\lambda)z_0(\lambda)s(\lambda)}{k(\lambda)\delta\varphi(\lambda)z_0(\lambda)z + D_{\text{ЗБП}}|z_0(\lambda) - z|} d\lambda. \quad (5)$$

В качестве источников излучения для таких систем предложено использовать RGB-светодиоды [4]. Они позволяют сочетать источники с разными длинами волн в одном корпусе, что упрощает оптическую схему. Выясним, насколько параметры данных светодиодов соответствуют требованиям построения системы. Для этого определим полуширину индикатрис их излучения $(\theta_{1/2\text{max}})$ и отклонение направления максимума излучения от оси светодиода.

Проведенные исследования подтвердили возможность применения данных светодиодов для определения величины вертикального градиента температуры [5]. При этом изображение источника проецировалось на цветное матричное фотоприемное поле, построенное по шаблону Байера.

Методы исследования

Исследования основаны на применении аналитических и численных методов теории геометрической и физической оптики, теории оптико-электронных приборов, на методике определения пространственного распределения энергетической чувствительности для монохромных составляющих оптического излучения [6] и математическом моделировании влияния температуры воздушного тракта на распространение пучка лучей.

Полученные результаты

Исследование параметров RGB светодиодов

Проводились измерения светодиодов фирмы «A-Bright» марки AL513RGB (3 шт) и фирмы «BetLux» марки BL-L515 (3 шт).

Таблица 1

Результаты измерения параметров RGB-светодиодов

Марка светодиода	AL513RGB				BL-L515			
	А		Б		А		Б	
Плоскость измерения								
Канал, λ , мкм	0,63	0,473	0,63	0,473	0,636	0,469	0,636	0,469
$\theta_{1/2\text{max}}$	62°	53°	49°	50°	128°	125°	134°	140°
Отклонение от оси	3°	3°	13°	8°	3°	3°	12°	10°
Угол между направлениями индикатрис	0°		21°		0°		22°	

Для измерения индикатрисы использовался спектрометр «Ocean Optics USB – 4000» и угловая подвижка. Измерения проводились в диапазоне от 0° до 180° в двух плоскостях (плоскости расположения контактов светодиода – далее плоскость А и перпендикулярной ей плоскости – далее плоскость Б).

Результаты измерений во взаимно перпендикулярных плоскостях А и Б см. в Табл. 1

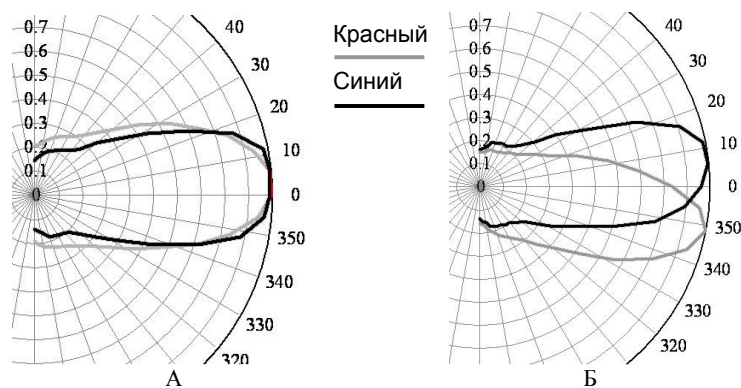


Рис. 2. Индикатриса AL513RGB (в относительных единицах): А – в плоскости контактов; Б – в плоскости перпендикулярной плоскости контактов

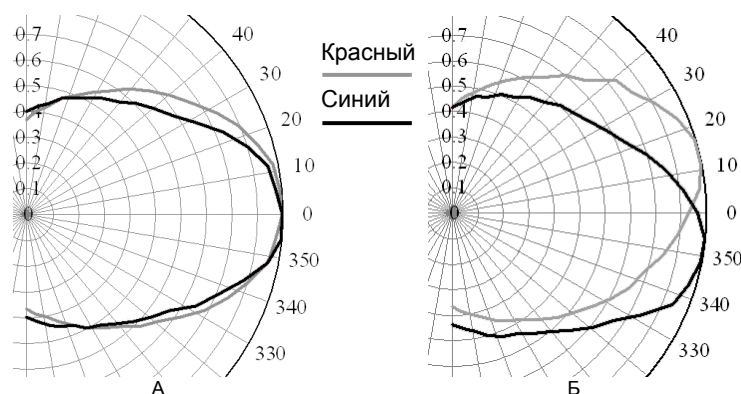


Рис. 3. Индикатриса BL-L515 (в относительных единицах): А – в плоскости контактов, Б – в плоскости перпендикулярной плоскости контактов

Вывод

Источники марки AL513RGB обладают лучшими характеристиками (узконаправленной индикатрисой и, следовательно, большей яркостью излучения в направлении) по сравнению со светодиодами BL-L515. Однако использование этих светодиодов усложняет юстировку, так как невозможно совместить направления максимального излучения сразу двух индикатрис, а это ведет к потере яркости в требуемом направлении.

Известно, что излучение разных длин волн формируется на разных кристаллах, источники излучения находятся не на оси светодиода, следовательно, освещенность на приемнике оказывается неравномерной. Для решения этой проблемы предлагается спроектировать оптическую схему конденсоров таким образом, чтобы в качестве источника излучения выступал входной зрачок конденсора, который может быть равномерно засвечен красной и синей составляющей излучающего светодиода, если расположить его в области пересечения индикатрис.

Разработка оптической схемы для работы на нескольких длинах волн

Уменьшение границы между рабочими гранями делительного элемента оптико-электронной насадки на теодолит (ОЭННТ) позволяет уменьшить линейный размер переходной зоны ОРСЗ и тем самым увеличить точность позиционирования рабочего органа машины [6].

В оптической схеме ОЭННТ для уменьшения размера границы между двумя рабочими поверхностями призмы предлагается замена прямоугольной разделительной призмы ПУЛ-Н на призму-куб 2 (рис. 4) с отражающим покрытием на половине гипотенузной грани. В этом случае граница нанесенного покрытия может быть выполнена с точностью до единиц микрон [7], в то время как в отражательной призме достигается минимальный размер притупления ребра между рабочими гранями не менее 5 мкм.

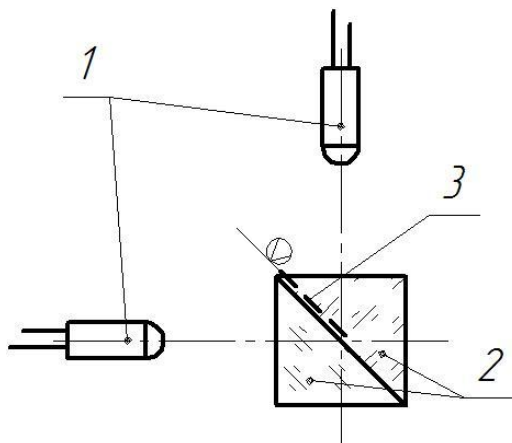


Рис. 4. Оптическая схема излучательного блока: 1 – каналы излучения (условно), 2 – призма куб, 3 – отражающее покрытие на половине гипотенузной грани

Для реализации двухволнового метода требуется совместить изображения источников с разной длиной волны на границе фотолитографического покрытия, нанесенного на половину гипотенузной грани (рис. 4). Для этого требуется рассчитать конденсор для каждого канала (красного и синего).

Существует несколько вариантов построения оптической схемы для реализации двухволновой оптической равносигнальной зоны. Для решения этой задачи могут использоваться светодиоды, имеющие только одну длину волны: два светодиода создают канал с одной длиной волны (например, красный) и два – с другой (синий). При выборе источников для такой схемы следует принимать во внимание то, что чем больше разница в длинах волн, тем точнее можно определить погрешность, вносимую градиентом температуры, согласно формуле

$$\text{grad}_y T = \frac{2T(y(\lambda_1) - y(\lambda_2))}{z_0^2(n(\lambda_2) - n(\lambda_1))}, \quad (6)$$

где $y(\lambda_1)$, $y(\lambda_2)$ – смещение, вызванное градиентом температуры $\text{grad}_y T$ для излучения длин волн λ_1 , λ_2 ; z_0 – дистанция фокусировки задатчика базового направления; $n(\lambda_1)$, $n(\lambda_2)$ – показатель преломления воздуха для длин волн λ_1 , λ_2 .

В качестве источников в таком случае в паре могут использоваться светодиоды марок АЛ107Б (0,95 мкм) и ЗЛ136-А (0,43 мкм).

Для такого варианта была рассчитана схема блока излучателей, представленная на рис. 5.

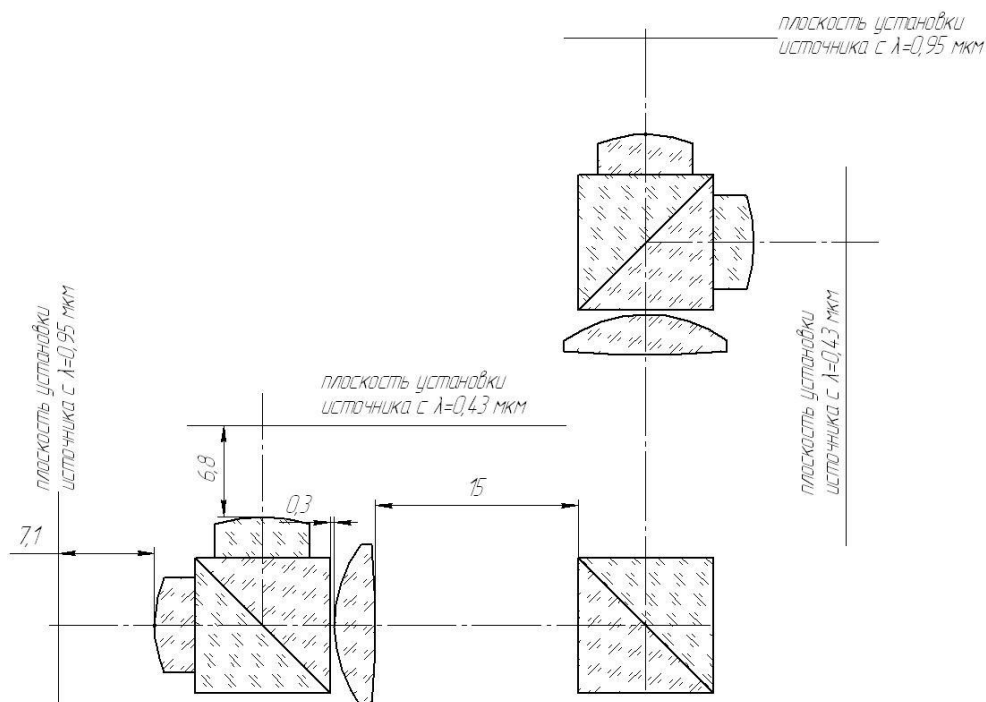


Рис. 5. Оптическая схема блока излучателей

К достоинствам такой схемы можно отнести:

- возможность выбора светодиодов с большой разностью по длине волны (их мощность излучения составляет 0,6 мВт для 3Л136-А и 5 мВт для АЛ 107Б при прямом токе 50 мА);
- возможность юстировки индикатрисы каждого светодиода в отдельности, что позволяет наиболее эффективно использовать энергию излучения.

Недостаток – сложность изготовления оптической системы. Однако использование RGB-светодиодов позволяют упростить оптическую схему, поскольку появляется возможность заменить четыре источника на два. Рассчитанная оптическая схема представлена на рис. 6.

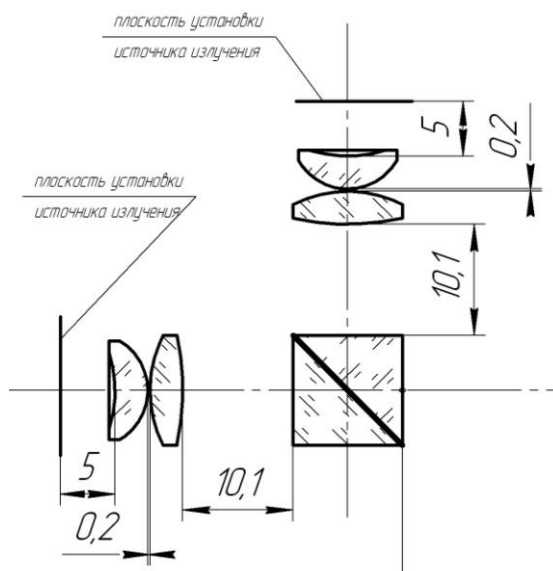


Рис. 6. Оптическая схема блока излучателей с применением RGB-светодиодов

Ее достоинства: меньшее количество оптических элементов, простота юстировки; меньшие габаритные размеры.

К недостаткам стоит отнести:

- невозможность направить индикатрисы излучения в одном направлении, что приводит к потерям энергии;
- меньшую мощность RGB-светодиодов по сравнению со светодиодами с одной длиной волны. Рассчитанная мощность их излучения при прямом токе 50 мА составляет 0,06 мВт – для красного канала и 0,089 мВт – для синего (светодиоды AL513RGB);
- разное положение максимумов облученности для синего и красного каналов таких светодиодов, что может привести к неправильной обработке сигнала на больших дистанциях.

В используемом объективе должна быть скомпенсирована хроматическая aberrация для используемых рабочих длин волн, поскольку разность в положении плоскостей фокусировки для двух длин волн влияет на энергетическую чувствительность системы согласно формулам (3) и (4). Эту задачу можно решить, используя ахромат.

В соответствии с габаритным расчетом для системы был выбран объектив ПУЛ-Н, скорректированный на хроматизм положения (рис. 7). Конструктивные параметры объектива представлены в Табл. 2.

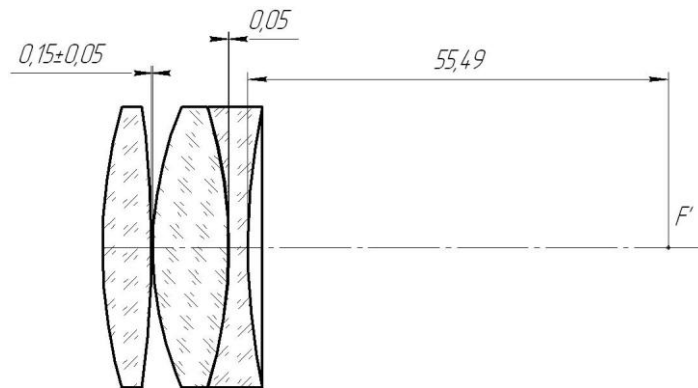


Рис. 7. Объектив задатчика базового направления

Таблица 1

Конструктивные параметры рассчитанного объектива

Конструктивные параметры						
Номер поверхности	R, мм	d, мм	Марка стекла	Показатель преломления n ($\lambda=0,462$ мкм)	Показатель преломления n ($\lambda=0,63$ мкм)	Световой диаметр, мм
1	132,13					34,0
2	-69,02	6,5	К8	1,523842	1,514758	33,71
3	46,88	0,15	воздух	1,0	1,0	31,66
4	-62,66	10	К8	1,523842	1,514758	28,81
5	-69,66	0,05	воздух	1,0	1,0	28,73
6	89,13	2,5	ТФ1	1,666037	1,649989	26,53
			воздух			

Исследование облученности в месте приема

На основе вышеизложенных принципов был сконструирован макет (рис. 8), позволяющий создать двухволновую оптическую равносигнальную зону. В макете использованы светодиоды марки AL513RGB.



Рис. 8. Макет системы

Качественно была определена освещенность, создаваемая системой, на расстоянии 1 м от ее объектива. На рис. 9 показано изображение, формируемое датчиком базового направления (ЗБН) на экране в красном канале. На изображении видна переходная зона.

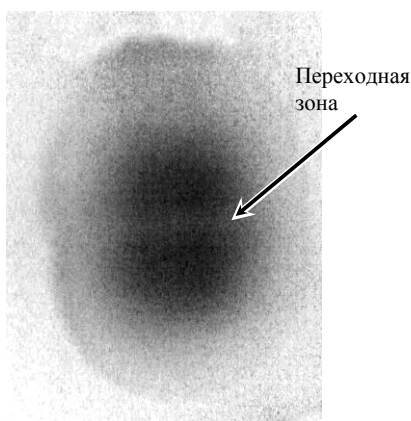


Рис. 9. Изображение, формируемое ЗБН (в инвертированном цвете)

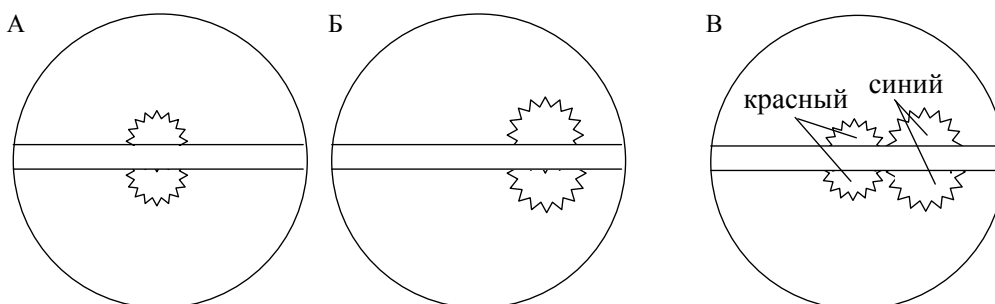


Рис. 10. А - красный канал; Б - синий канал; В - совместно два канала

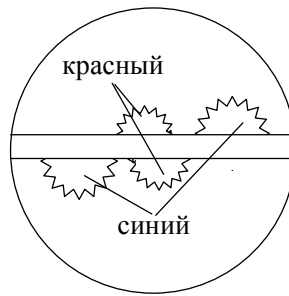


Рис. 11. Совместно два канала, один из светодиодов повернут

На рис. 10 схематически показано расположение максимумов освещенности в каждом канале. Полоса посередине – переходная зона. Причем заметно, что максимумы в красном и синем каналах расположены на некотором расстоянии друг от друга. Это обусловлено тем, что излучение разных длин волн в светодиоде формируется на разных площадках.

Вследствие этого, распределение освещенности (соответственно и облученности) по полю зависит от положения светодиодов в диафрагме. Например, на рис. 11 представлена ситуация, когда один из светодиодов повернут вокруг оси на 180° . Видно, что сместился один из максимумов в синем канале, положение красного почти не изменилось. Однако при больших расстояниях это расхождение может вызвать неправильную обработку сигнала на приемнике.

Разработка алгоритма обработки сигналов

Известно [1], что величина потока излучения, регистрируемого оптико-электронной системой с ОРСЗ, определяется по следующей формуле:

$$\Delta\Phi = \frac{\pi\tau_1\tau_2 S_{ЗБН} S_{ПЧ}}{z^2 l_{n1}} \Delta x (L'_{e(\lambda_1)} + L''_{e(\lambda_1)}) \sin \omega t, \quad (7)$$

где τ_1 – пропускание атмосферы; τ_2 – пропускание оптической системы; $S_{ЗБН}$ – площадь выходного зрачка ЗБН; $S_{ПЧ}$ – площадь входного зрачка ПЧ; $L'_{e(\lambda_1)}$, $L''_{e(\lambda_1)}$ – энергетическая яркость пары источников оптического излучения в канале; l_{n1} – линейный размер переходной зоны по одной из осей координат; ω – круговая частота модуляции; t – время.

Электрический сигнал (напряжение U), снимаемый с фотоприемника, связан с $\Delta\Phi$ через спектральную чувствительность приемника S [2].

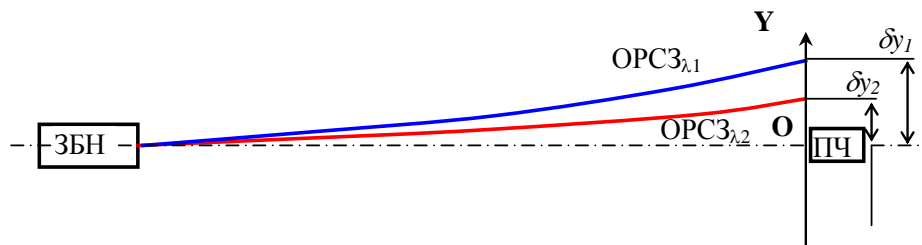


Рис. 12. Смещение ОРСЗ вследствие рефракции на длинах волн λ_1 и λ_2

Если приемник ОЭС расположен на оптической оси (рис. 12), то $grad_y T$ для первой и второй длин волн обусловит смещение ОРСЗ на величины на δy_1 и δy_2 соответственно, которые и вызовут появление электрических сигналов:

$$U_1 = 2 \frac{\tau_1 \pi S_1 S_{ЗБН} S_{ПЧ} L_1 \delta y_1}{z^2 l_{n1}} = \frac{\tau_1 \pi S_1 S_{ЗБН} S_{ПЧ} L_1 (n_1 - 1) grad_y T}{n_1 T l_{n1}}, \quad (8)$$

$$U_2 = 2 \frac{\tau_2 \pi S_2 S_{ЗБН} S_{ПЧ} L_2 \delta y_2}{z^2 l_{n2}} = \frac{\tau_2 \pi S_2 S_{ЗБН} S_{ПЧ} L_2 (n_2 - 1) grad_y T}{n_2 T l_{n2}}. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) видно, что величина разности выходных сигналов

$$U_1 - U_2 = \frac{A \pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} \delta y_2 (\delta y_1 - \delta y_2)}{z^2} = \frac{A \pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} (n_1 - n_2) grad_y T}{n_1 n_2 T}, \quad (10)$$

при выполнении условия

$$\frac{\tau_1 S_1 L_1}{l_{n1}} = \frac{\tau_2 S_2 L_2}{l_{n2}} = A \quad (11)$$

пропорциональна разности смещений ОРСЗ $\delta y_1 - \delta y_2$ или величинам разности показателей преломления воздушного тракта для рассматриваемых длин волн.

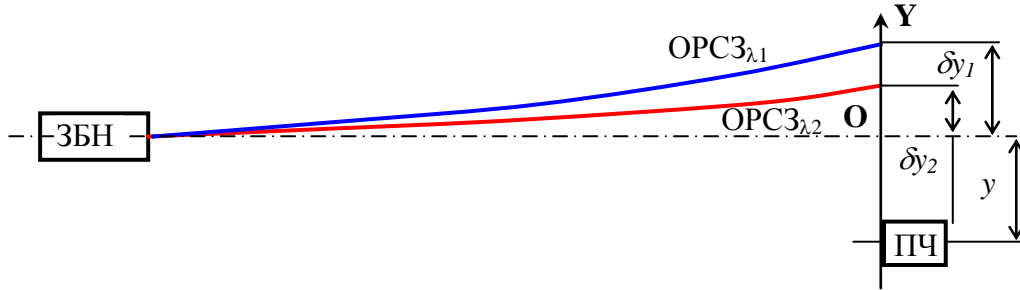


Рис. 13. Смещение ОРСЗ от базовой плоскости

При наличии смещения приемной части (ПЧ) (рис. 13) на величину y сигналы для выбранных длин волн при наличии градиента температур воздушного тракта $grad_y T$ будут равны:

$$U_{10} = 2 \frac{\tau_1 \pi S_1 S_{ЗБН} S_{ПЧ} L_1 (y + \delta y_1)}{z^2 l_{n1}}, \quad (12)$$

$$U_{20} = 2 \frac{\tau_2 \pi S_2 S_{ЗБН} S_{ПЧ} L_2 (y + \delta y_2)}{z^2 l_{n2}}. \quad (13)$$

В этом случае сигнал, снимаемый с фотоприемника, равен сумме электрических сигналов (12) и (13)

$$U_+ = U_{10} + U_{20} = \frac{2 \pi S_{ЗБН} S_{ПЧ}}{z^2} \left[\left(\frac{\tau_1 S_1 L_1}{l_{n1}} + \frac{\tau_2 S_2 L_2}{l_{n2}} \right) y + \left(\frac{\tau_1 S_1 L_1 \delta y_1}{l_{n1}} + \frac{\tau_2 S_2 L_2 \delta y_2}{l_{n2}} \right) \right] =$$

$$= \frac{2 \pi S_{ЗБН} S_{ПЧ}}{z^2} \left(\frac{\tau_1 S_1 L_1}{l_{n1}} + \frac{\tau_2 S_2 L_2}{l_{n2}} \right) y + \frac{\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} grad_y T}{T l_{n1}} \left(\frac{\tau_1 S_1 L_1 (n_1 - 1)}{n_1 l_{n1}} + \frac{\tau_2 S_2 L_2 (n_2 - 1)}{n_2 l_{n2}} \right).$$

(14) Величина поправки к смещению от градиента температуры воздушного тракта будет определяться при работе ОЭС с ОРСЗ в режиме измерения разности электрических сигналов (12) и (13):

$$U_- = U_{10} - U_{20} = \frac{2\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ}}{z^2} \left(\frac{\tau_1 S_1 L_1}{l_{n_1}} - \frac{\tau_2 S_2 L_2}{l_{n_2}} \right) y + \frac{\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} \text{grad}_y T}{T l_{n_1}} \left(\frac{\tau_1 S_1 L_1 (n_1 - 1)}{n_1 l_{n_1}} - \frac{\tau_2 S_2 L_2 (n_2 - 1)}{n_2 l_{n_2}} \right). \quad (15)$$

Пусть в устройстве реализовано условие (11), тогда суммарный сигнал будет равен

$$U_+ = U_{10} + U_{20} = \frac{4A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} y}{z^2} + \frac{A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} \text{grad}_y T}{T} \left(\frac{(n_1 - 1)}{n_1} + \frac{(n_2 - 1)}{n_2} \right) = A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} \left(\frac{4y}{z^2} + \frac{\text{grad}_y T (2n_1 n_2 - n_2 - n_1)}{n_1 n_2 T} \right). \quad (16a)$$

разностный сигнал

$$U_- = U_{10} - U_{20} = A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} \text{grad}_y T \frac{(n_1 - n_2)}{n_1 n_2 T}. \quad (17)$$

Используя работу разностного канала, выполняющего измерения в соответствии с (17), определим величину $\text{grad}_y T$, которая будет равна

$$\text{grad}_y T = \frac{n_1 n_2 T U_-}{A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} (n_1 - n_2)}. \quad (18)$$

Из (16) с учетом выражения (18) получим суммарный сигнал:

$$U_+ = U_{10} + U_{20} = A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} \left(\frac{4y}{z^2} + \frac{\text{grad}_y T (2n_1 n_2 - n_2 - n_1)}{n_1 n_2 T} \right) = A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} \left(\frac{4y}{z^2} + U_- \frac{2n_1 n_2 - n_2 - n_1}{A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} (n_1 - n_2)} \right). \quad (19)$$

Из выражения (19) можно определить искомую величину смещения ПЧ y , исключаящую воздействие градиента температуры,

$$y = \left(\frac{U_+}{A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ}} - \frac{(2n_1 n_2 - n_2 - n_1) U_-}{A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ} (n_1 - n_2)} \right) \frac{z^2}{4} = \left(U_+ - U_- \frac{n_1 (n_2 - 1) + n_2 (n_1 - 1)}{n_1 - n_2} \right) \frac{z^2}{4A\pi S_{ЗБН} S_{ПЧ}}. \quad (20)$$

Из выражения (20) видно, что величина смещения пропорциональна сумме сигналов основного U_+ и вспомогательного U_- каналов.

Обработку сигнала можно осуществить при помощи электронной схемы, представленной на рис. 14. Базовая равносигнальная плоскость формируется объективом Об1 прожектора путем проецирования на границу зеркального покрытия, нанесенного на гипотенузную грань призмы-куба ПК. Излучение от ПИД1, отраженное от зеркального покрытия на гипотенузной грани, и излучение от ПИД2, прошедшее через призму без отклонения, направляется по стрелке (рис. 6). Излучение от светодиодов ПИД1 и ПИД2 образует два канала: «верхний» и «нижний». На площадки ИП-R1 и ИП-R2, излучающие на красной длине волны, подается ток, модулированный частотами f_1 («верхний» канал) и f_2 («нижний» канал) ($f_2 = 2,5f_1$). На площадки площадок ИП-V1 и ИП-V2, излучающие на синей

длине волны, также подается ток, модулированный частотами f_3 («верхний» канал) и f_4 («нижний» канал) ($f_4 = 2,5f_3$). Таким образом, пучок лучей, посылаемых прожектором ПР, оказывается «разрезанным» горизонтальной плоскостью на две части. Эта граница и является базовой плоскостью для каждого канала.

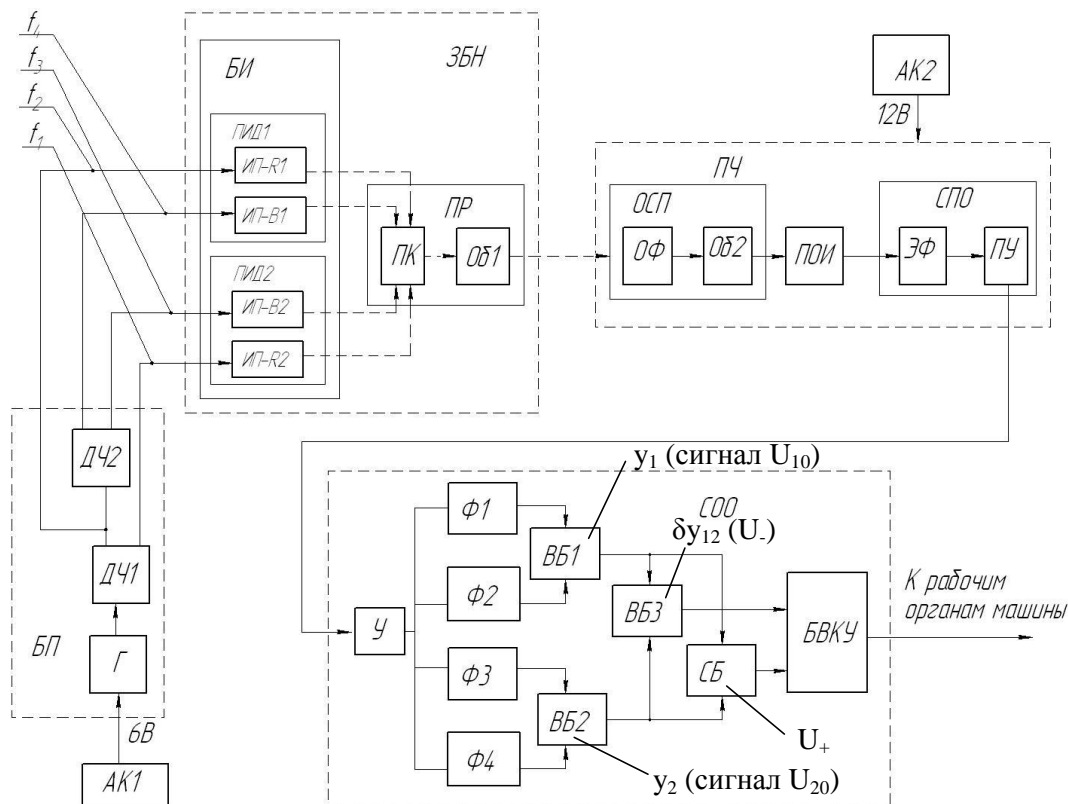


Рис. 14. Электронная схема обработки сигналов в оптико-электронной насадке на теодолит

Приемная часть (ПЧ) состоит из оптического фильтра (ОФ), объектива (ОБ2) и приемника оптического излучения (ПОИ) с предусилителем (ПУ). При сдвиге ПЧ вверх или вниз от базовой плоскости в каждом канале начинает преобладать поток одной из частот. В схеме окончательной обработки (СОО) информации сигнал с ПОИ после усилителя У разделяется в электронных фильтрах $\Phi 1$ и $\Phi 2$ на две компоненты с частотами f_1 и f_2 для красного канала и фильтрах $\Phi 3$ и $\Phi 4$ с частотами f_3 и f_4 для синего. По разности сигналов, вычисляемой в вычитающих блоках (ВБ1 и ВБ2), определяется смещение приемной части от базовой плоскости для красного и синего каналов соответственно. В вычитающем блоке (ВБ3) определяется разность между положениями базовых плоскостей двух каналов y_1 (сигнал U_{10}) и y_2 (сигнал U_{20}) $\delta y_{12}(U)$. В суммирующем блоке (СБ) определяется сумма сигналов U_+ . Блок выработки команд управления (БВКУ) задает направление перемещения рабочего органа машины в соответствии с алгоритмом вычисления, описанным выше.

Электронная схема блока питания (БП) задачика базового направления (ЗБН) содержит задающий кварцевый генератор частоты (Г), делители частот (ДЧ1 и ДЧ2) электрического сигнала, с выхода которого и снимаются импульсы тока, питающего светодиоды, отличающиеся друг от друга по частоте в 2,5 раза: $f_4 = 2,5f_3 = 6,25f_2 = 15,625f_1$, что исключает их взаимное влияние. Питание системы осуществляется от аккумуляторов АК1, АК2.

Таким образом, оптико-электронная насадка (ОЭН) позволит преобразовать стандартные геодезические приборы мелиораторов, строителей и дорожников – нивелиры или теодолиты – в

системы с высокоточной установкой заданного уклона при малом энергопотреблении и широкой зоне управления.

Области возможного применения

Использование ОЭН целесообразно в мелиоративных работах: для планировки земляных участков, которые готовятся под сплошной залив водой (рисовые чеки и т. п.), в строительстве при укладке асфальтовых или бетонных площадок, монтаже междуэтажных перекрытий, контроле положения скользящих опалубок при возведении монолитных объектов, строительстве дорог, насыпей, каналов и т. д.

Заключение

В работе были исследованы параметры RGB-светодиодов, в том числе характер распределения направленности их излучения. Качественно изучено распределение облученности, создаваемой системой с оптической равносигнальной зоной при использовании RGB-светодиодов. Показано, что наблюдается разность в положении максимумов облученности из-за расположения излучающих площадок в RGB-светодиоде. Рассмотрены другие источники излучения, которые могут быть использованы при создании двухволновой ОРСЗ. Для ее реализации предложены две оптические схемы, отмечены их достоинства и недостатки. Для алгоритма электронной обработки сигнала составлена электрическая схема.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке различных оптико-электронных приборов с использованием указанного типа ПИД.

Публикации

1. Мараев А.А. Повышение точности позиционирования с помощью оптико-электронной насадки на теодолит ПУЛ-Н // Сб. трудов конференции молодых ученых. Вып. 1. Оптехника и оптическое приборостроение. СПб., 2009. С. 329–333.
2. Коротаев В.В., Мараев А.А., Похитонов П.П., Тимофеев А.Н. Аппаратное снижение погрешности позиционирования в оптико-электронной насадке на теодолит ПУЛ-Н // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2009. № 5 (63). С. 5–9.
3. Богатинский Е.М., Мараев А.А. Расчет энергетической чувствительности в оптической равносигнальной зоне при мультиплексировании оптического излучения по длине волны // Труды шестой международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2009» (Санкт-Петербург, 19–23 октября 2009). СПб., 2009. С. 291–292.
4. Мараев А.А. О распределении энергетической чувствительности в двухволновой оптической равносигнальной зоне // Сб. тезисов докладов конференции молодых ученых. Вып. 2. Труды молодых ученых. СПб., 2010.
5. Богатинский Е.М., Коротаев В.В., Мараев А.А., Тимофеев А.Н. Исследование путей ослабления влияния воздушного тракта в распределенных оптико-электронных системах предупреждения техногенных катастроф // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 3 (67). С. 130.
6. Мараев А.А., Тимофеев А.Н. Исследование распределения энергетической чувствительности в полихроматической оптической равносигнальной зоне // 9 Международная конференция «Прикладная оптика-2010» (Санкт-Петербург, ГОИ им. С.И. Вавилова, 18–22 октября 2010). Сб. трудов. Т. 1. Ч. 1. СПб., 2010. С. 241–245.

7. Мараев А.А., Пантюшин А.В., Тимофеев А.Н., Ярышев С.Н. Исследование метода спектрально-селективной селекции в оптико-электронной системе предупреждения техногенных катастроф // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 12. С. 80–81.
8. Мараев А.А. Исследование погрешностей оптико-электронной насадки для управления строительными машинами // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров НИУ ИТМО. СПб., 2011.
9. Мараев А.А. Об эффективности энергетической чувствительности в приборах с полихроматической оптической равносигнальной зоне // Сб. тезисов докладов конференции молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2011. С. 118–119.
10. Мараев А.А., Тимофеев А.Н., Коняхин И.А. Исследование энергетической чувствительности в оптико-электронных системах с полихроматической оптической равносигнальной зоной // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 3. С. 31–35.
11. Мараев А.А. О возможности использования RGB-светодиодов в системах с двухволновой оптической равносигнальной зоной // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2012. С. 414.
12. Мараев А.А., Тимофеев А.Н. Особенности использования RGB-светодиодов в системах с двухволновой оптической равносигнальной зоной // Труды X Международной конференции «Прикладная оптика-2012» (15–19 октября 2012 г., секция 1 «Оптическое приборостроение»). СПб., 2012. С. 164–166.
13. Коротаев В.В., Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Горбачёв А.А., Чертов А.Н. и др. (всего 50 человек). Исследование и разработка многопараметрических измерительных преобразователей, приборов и комплексов многофункционального приборостроения для промышленных систем управления. Отчет по НИР № 390134 (Государственный контракт № 02.740.11.0169 от 25 июня 2009 г.). Г.Р. № 01200959042. Этап 1 (Проведение исследований и разработка документации на макеты и экспериментальные образцы элементов многофункционального приборостроения). СПб., 2009. – 440 с.
14. Панков Э.Д., Анисимов А.Г., Араканцев К.Г., Богатинский Е.М., Горбунова Е.В. и др. (всего 17 человек). Исследование принципов инвариантности в распределенных оптико-электронных системах лазерной локации, контроля пространственного положения и мониторинга технической среды. Отчет по НИР № 18006. Г.Р. № 01200804817. Этап 2 (Развитие метода частных инвариантных преобразований в распределенных оптико-электронных структурах локации и мониторинга технической среды). СПб., 2009. – 124 с.
15. Коротаев В.В., Коняхин И.А., Тимофеев А.Н. и др. (всего 57 человек). Исследование и разработка многопараметрических измерительных преобразователей, приборов и комплексов многофункционального приборостроения для промышленных систем управления. Отчет по НИР № 390134. Г.Р. № 01200959042. Этап 2 (Разработка системы адаптивного распознавания объектов производственных сцен и изготовление основных узлов экспериментальных образцов оптико-электронных преобразователей и макетов датчиков многофункционального приборостроения). СПб., 2010. – 307 с.
16. Коротаев В.В., Алеев А.М., Анисимов А.Г. и др. (всего 16 человек). Исследование и разработка многофункциональной оптико-электронной системы высокоточного позиционирования элементов крупногабаритных конструкций в промышленных системах управления технологическими процессами. Отчет по НИР № 390141. Г.Р. № 01200960577. Этап 2. СПб., 2010. – 139 с.

17. Тимофеев А.Н., Андреев А.А., Арефьева Е.А. и др. (всего 16 человек). Исследование оптико-электронных систем предупреждения техногенных катастроф. Отчет по НИР № 390142. Этап 2. СПб., 2010. – 193 с.
18. Михеев С.В., Анисимов А.Г., Арефьева Е.А. и др. (всего 13 человек). Исследование структур распределенных оптико-электронных систем долговременного контроля состояния сооружений по пространственному положению их элементов. Отчет по НИР № 390144. Г.Р. № 01200960574. Этап 2. СПб., 2010. – 176 с.
19. Коротаев В.В., Лебедько Е.Г., Коняхин И.А. и др. (всего 30 человек). Развитие теории оптико-электронных информационно-измерительных и видеoinформационных распределенных систем анализа совокупности изображений. Отчет по НИР № 190095. Г.Р. № 01200952183. Этап 3. СПб., 2010. – 125 с.
20. Коротаев В.В., Лебедько Е.Г., Коняхин И.А. и др. (всего 31 человек). Развитие теории оптико-электронных информационно-измерительных и видеoinформационных распределенных систем анализа совокупности изображений. Отчет по НИР № 190095. Г.Р. № 01200952183. Этап 4. СПб., 2010. – 157 с.
21. Панков Э.Д., Анисимов А.Г., Андреев А.А. и др. (всего 18 человек). Исследование принципов инвариантности в распределенных оптико-электронных системах лазерной локации, контроля пространственного положения и мониторинга технической среды. Отчет по НИР № 18006. Г.Р. № 01200804817. Этап 3 (Исследование инвариантных преобразований информативных параметров в анаморфотных оптико-электронных системах мониторинга технической среды). СПб., 2010. – 118 с.
22. Тимофеев А.Н., Андреев А.А., Арефьева Е.А. и др. (всего 18 человек). «Исследование оптико-электронных систем предупреждения техногенных катастроф» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. Отчет по НИР № 390142. Г.Р. № 01200960576. Этап 3. СПб., 2011. – 192 с.
23. Коротаев В.В., Алеев А.М., Анисимов А.Г. и др. (всего 26 человек). Исследование и разработка многофункциональной оптико-электронной системы высокоточного позиционирования элементов крупногабаритных конструкций в промышленных системах управления технологическими процессами. Отчет по НИР № 390141. Г.Р. № 01200960577. Этап 3. СПб., 2011. – 152 с.
24. Михеев С.В., Анисимов А.Г., Арефьева Е.А. и др. (всего 17 человек). Исследование структур распределенных оптико-электронных систем долговременного контроля состояния сооружений по пространственному положению их элементов. Отчет по НИР № 390144. Г.Р. № 01200960574. Этап 3. СПб., 2011. – 131 с.
25. Панков Э.Д., Алеев А.М., Анисимов А.Г. и др. (всего 22 человека). Исследование принципов инвариантности в распределенных оптико-электронных системах оптической локации и мониторинга технической среды. Отчет по НИР № 18006. Г.Р. № 0120.0 804817. Этап 4 (Исследование информационных искажений при инвариантных преобразованиях в композиционных анаморфотных оптико-электронных системах контроля пространственного положения и мониторинга технической среды). СПб., 2011. – 131 с.

Литература

1. Джабиев А.Н., Мусяков В.Л., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной. СПб., 1998. – 238 с.
2. Витол Э.А., Мусяков В.Л., Коняхин И.А., Тимофеев А.Н. Реализация дисперсионного метода в оптико-электронных системах с оптической равносигнальной зоной // Сб. трудов *Сборник работ аспирантов НИУ ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга*

- VI Международной конференции «Прикладная оптика» (СПб., 18–21 октября 2004 г.). СПб., 2004. Т. 1. С. 37–40.
3. Витол Э.А. Ослабление влияния регулярной рефракции на точность работы оптико-электронной системы // Сб. трудов конференции «Оптика 2003» (СПб., 20–23 октября 2003 г.). СПб., 2003. С. 137.
4. Мараев А.А. Исследование энергетической чувствительности в оптико-электронных системах с полихроматической оптической равносигнальной зоной // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 3. С. 31-35.
5. Мараев А.А., Пантюшин А.В., Тимофеев А.Н., Ярышев С.Н. Исследование метода спектральной селекции в оптико-электронной системе предупреждения техногенных катастроф // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 12. С. 80–81.
6. Коротаев В.В., Мараев А.А., Похитонов П.П., Тимофеев А.Н. Аппаратное снижение погрешности позиционирования в оптико-электронной насадке на теодолит ПУЛ-Н // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2009. № 5 (63). С. 5–9.
7. Кручинин Д.Ю. Фотолитографические технологии в производстве оптических шкал (сеток) // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 2. С. 71–73.



Обертов Дмитрий Евгеньевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: dimondking@mail.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КЛАССОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Д.Е. Обертов

Научный руководитель – профессор Б.Р. Андриевский

Введение

Цель работы – разработка алгоритма определения классов транспортных средств (ТС) с помощью пьезоэлектрического акселерометра, устанавливаемого на дорожную разметку.

В работе были использованы такие методы исследования, как эксперименты на дорогах, методы сигнальной обработки экспериментальных данных – фильтрация, сглаживание скользящим окном, спектральный анализ (быстрое и короткооконное преобразования Фурье), математическая обработка данных с использованием анализа производной сигнала, моделирование в Matlab/Simulink.

В последнее десятилетие все большее внимание уделяется построению интеллектуальных транспортных систем, в том числе интеллектуальных дорог, которые снабжены средствами, позволяющими обеспечивать взаимодействие и связь между транспортной инфраструктурой и ТС.

Применение этих средств создает возможности для контроля дорожного движения, повышения безопасности, уменьшения заторов и пробок на дорогах, ведения статистики дорожного движения, идентификации классов ТС, контроля скорости и т. п. [1, 2].

Идентификация классов ТС – важный компонент безопасности дорожного движения. Поэтому разработка системы и алгоритма, который с большой производительностью и надежностью мог бы работать в различных погодных условиях и в любое время суток является актуальной. Также необходимо по возможности обеспечить бесконтактность измерений, которая позволит продлить срок эксплуатации системы, уменьшить количество переустановок оборудования и вмешательство людей в дорожное движение, приводящее к его нарушению во время установки.

ТС могут быть классифицированы по различным критериям в зависимости от поставленных задач. Наиболее очевидным является применение идентификации классов ТС для мониторинга дорожного движения и набора статистики [3, 4, 5]. Статистика необходима как характеристика описания движения транспорта в одном определенном месте в зависимости от времени суток, дня недели и времени года. В дальнейшем эта информация может быть использована для планирования ремонта дорог, организации других эксплуатационных мероприятий и принятия мер по разгрузке транспортной сети.

В данной работе исследуется возможность использования акселерометров для идентификации классов автомобилей. Узлы-датчики, состоящие из одного акселерометра и магнитометра, устанавливаются на дорожную разметку. Расстояние между соседними узлами 50 м. Датчики обмениваются информацией по беспроводной сети между собой и серверами, расположенными вдоль дороги. Установка датчиков на дорожную разметку позволит повысить время их эксплуатации благодаря меньшему количеству наездов ТС, а также позволит обеспечить бесконтактность измерений. Акселерометры измеряют вибрации дороги, поэтому отсутствует непосредственный контакт датчиков с автомобилями. Магнитометры измеряют магнитные поля, создаваемые автомобилями. Планируется использовать их в будущем для измерения скорости автомобилей. Сейчас скорость считается известной.

Идентификация классов ТС

По международной классификации в зависимости от расстояния между соседними колесами существует пять типов осей: А, В, С, D, Е (рис. 1). Если колесная база (расстояние между соседними осями автомобиля) от 80 до 180 см, то ТС относится к мотоциклам, если от 180 до 330 см – к легковым автомобилям и т. д. Возможны и более сложные комбинации осей (рис. 1).

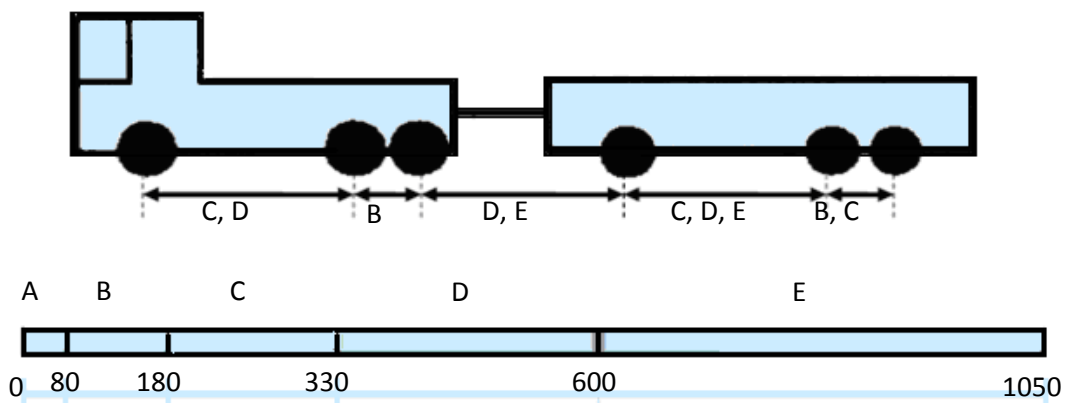







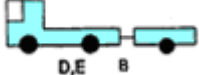
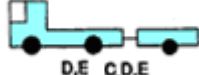

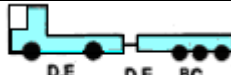
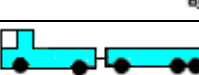



Рис. 1. Классификация колесных баз автомобилей

На основе анализа колесной базы ТС – продольного расстояния между соседними осями – разработана классификация ТС (Табл. 1).

Таблица 1

Классификация ТС по колесной базе

Класс автомобиля	Классы осей	Условное изображение класса	Обозначение автомобиля
Мотоцикл	B		MC
Легковой автомобиль	C		P20
Легковой автомобиль с прицепом	C-C, D		P21
	C-B, C, D-A		P22
Грузовик (2 оси)	D, E		L20
Грузовик (2 оси) с прицепом	D, E-C		L21
	D, E-D, E		L22
	D, E-B		L23
	D, E-C, D, E		L24
	D, E-B, C, D, E-B, C, D, E		L25
	D, E-D, E-B, C-B, C		L26
	D, E-B, C-C, D, E-B, C		L27
Грузовик (3 оси)	C, D-B		L30
Грузовик (3 оси) с прицепом	C, D-B-C		L31
	C, D-B-D, E		L32
	C, D-B-B		L33
	C, D-B-C, D, E		L34
	C, D-B-C, D, E-B, C, D, E		L35
	C, D-B-D, E-B, C-B, C		L36
	C, D-B-B, C-C, D, E-B, C		L37

Реализация алгоритма и результаты экспериментальных исследований

Последовательность действий при обработке данных, поступающих с акселерометров, показана на рис. 2.

Сначала идет предварительная пошаговая обработка информации, направленная на обнаружение автомобилей. Далее определяется класс ТС. Для этого выполняется следующая последовательность операций (рис. 3).

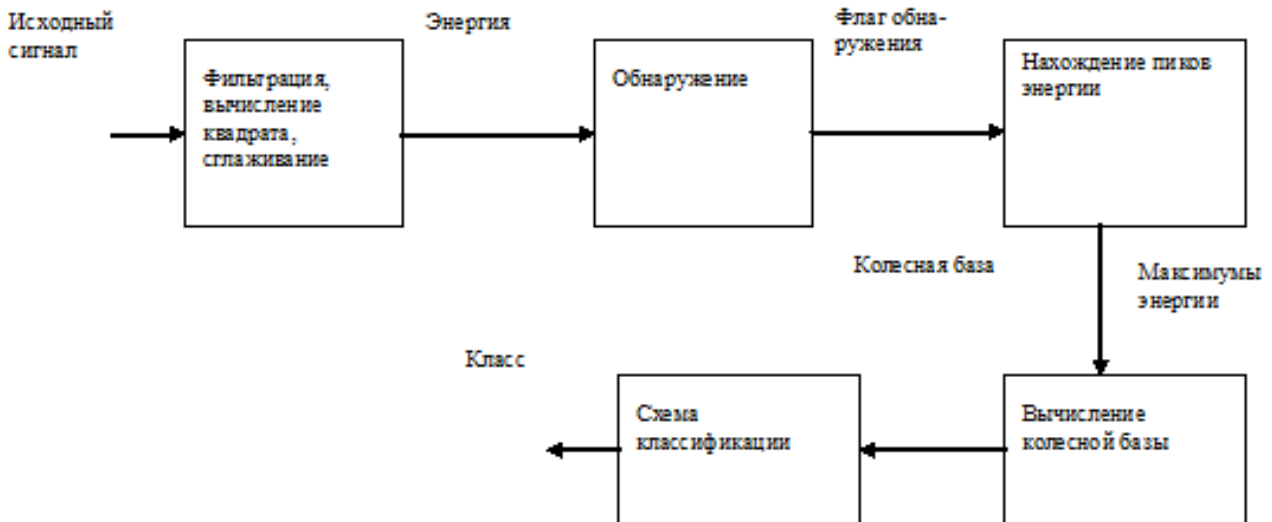


Рис. 2. Последовательность действий при обработке данных, поступающих с акселерометров

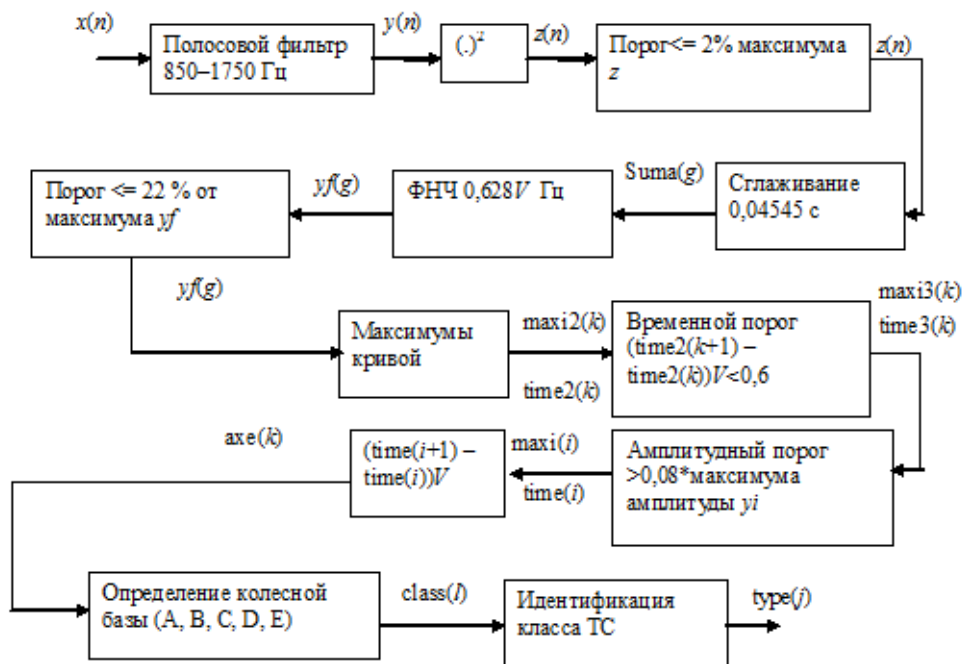


Рис. 3. Последовательность действий для идентификации классов ТС с использованием акселерометров (фрагменты программы)

1. Первоначальные данные, полученные с акселерометров, проходят через полосовой фильтр (ПФ), так как рассматриваемый частотный диапазон соответствует области максимальных амплитуд сигнала. Предварительная обработка сигналов с помощью быстрого и короткооконного преобразований Фурье, необходимая для исключения низкочастотных и высокочастотных помех, выявила частотный диапазон от 850 до 1750 Гц. Используется эллиптический фильтр, обеспечивающий максимальное затухание сигнала в полосе задерживания [6]. Частоты среза ПФ выбираются на основе предварительной обработки данных и анализе спектральных характеристик.

2. Данные, полученные на выходе полосового фильтра, возводятся в квадрат: $z(iT) = y(iT)^2$, где $i = 0, 1, 2, \dots$ – дискретное время; T – интервал квантования (частота дискретизации датчика).

3. Величина сигнала сравнивается с пороговым значением и обнуляется, если он меньше:

$$\text{threshold} = 0,02 \cdot \text{maximum}(z);$$

$$z(iT)^* = \begin{cases} z(iT), & \text{если } z(iT) \geq \text{threshold}, \\ 0, & \text{иначе } z(iT) < \text{threshold}, \end{cases}$$

$$z(iT) < \text{threshold}, \text{ тогда } z(iT) = 0.$$

4. Выполняется сглаживание с помощью скользящего окна с временем сглаживания t .

5. Сигнал $z(i)$ проходит через эллиптический фильтр нижних частот (ФНЧ), частота среза выбирается в зависимости от скорости ТС: $w = f(V)$ [Гц], где V – скорость ТС, км/ч.

6. Величина сигнала сравниваются с пороговым значением и обнуляются, если они меньше:

$$\text{suma}(i)^* = \begin{cases} \text{suma}(i), & \text{если } \text{suma}(i) \geq \text{threshold}, \\ 0, & \text{иначе } \text{suma}(i) < \text{threshold}, \end{cases}$$

$$\text{threshold} = \begin{cases} 0,33 \text{maximum}(\text{suma}), & \text{если } yf > 0,00005, \\ 0,22 \text{maximum}(\text{suma}), & \text{иначе } yf \leq 0,00005, \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, k,$$

где yf – сигнал на выходе ФНЧ. Числа 0,33 и 0,22 получены экспериментальным путем.

7. Выполняется алгоритм поиска максимумов кривой y_i .

8. Для удаления «плохих» пиков (максимумов) используется пороговое ограничение. Колесную базу меньше 60 см (0,6 м) не анализируют. Она может быть найдена согласно оператору: $(\text{time2}(i+1) - \text{time2}(i)) \cdot V$.

9. Амплитудный и временной пороги используются для удаления пиков с малой амплитудой и маленькой шириной импульса (временной порог). Порог амплитуды составляет 8 % от максимального значения.

Временной порог пересчитывается в расстояние аналогично расчету колесной базы. Ширина импульса умножается на скорость. Импульсы шириной меньше 70 см не анализируются.

10. Выполняется алгоритм определения колесной базы (А, В, С, D, E). Он реализован в соответствии с рис. 1.

11. Алгоритм классификации ТС осуществляется в соответствии с рис. 1 и рис.2.

Графики сигналов, полученные в важнейших точках алгоритма, реализующего идентификацию классов ТС представлены на рис. 4.

Алгоритм был протестирован на основе серии экспериментов, проведенных на дорогах в окрестности города Лулео (Швеция). В результате экспериментов были найдены следующие параметры:

- нижняя частота среза $f_n = 850$ Гц;
- верхняя частота среза $f_v = 1750$ Гц;
- частота среза для ФНЧ $w = 0,628V$ Гц;
- для скользящего окна $t = 0,045$ с.

Коэффициент 0,045 получен эмпирически для акселерометров с частотой дискретизации 22 000 Гц.

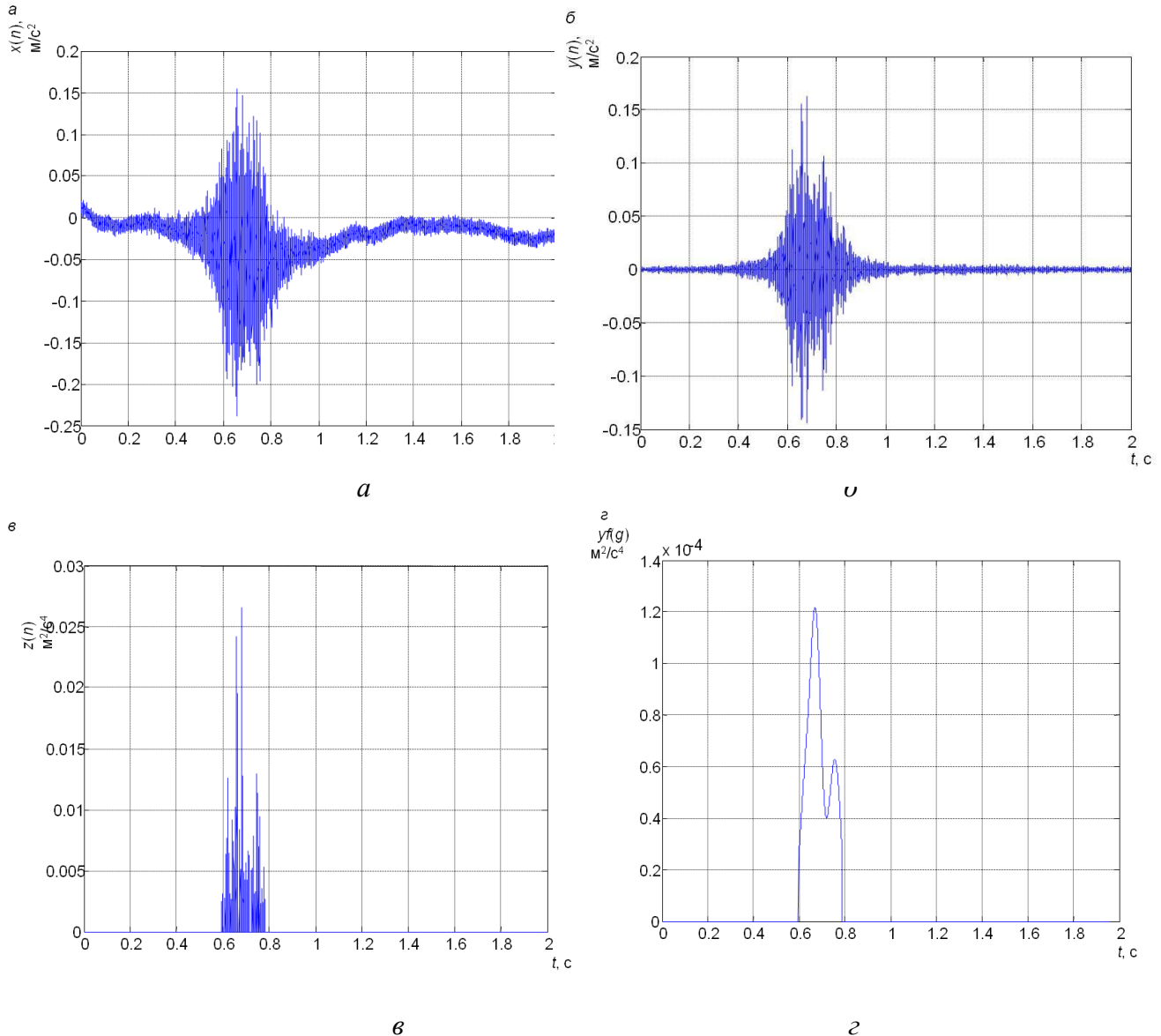


Рис. 4. Графики сигналов в важных точках алгоритма: а – $x(n)$ (исходный сигнал с акселерометра); б – $y(n)$ (после полосового фильтра); в – $z(n)$ (после возведения в квадрат и сравнения с порогом); г – $yf(g)$ (после сглаживания скользящим окном и ФНЧ и после удаления помех)

Области возможного использования

Эти результаты могут быть использованы в реальных системах дорожного хозяйства для построения интеллектуальных систем дорожного движения, идентификации классов ТС, подсчета количества ТС и мониторинга их скорости. В последнем случае необходимо использовать два датчика, однако это предмет последующих исследований.

Заключение

Разработан алгоритм идентификации классов ТС с использованием акселерометров. Классы автомобилей идентифицируются достаточно точно, но для этого необходимо знать их скорость. Полученные результаты могут быть использованы для построения интеллектуальных

систем дорожного движения, идентификации классов ТС, подсчета их количества и мониторинга скорости. В последнем случае необходимо использовать два датчика, однако это предмет последующих исследований.

Публикации

1. Обертов Д.Е., Бардов В.М. Алгоритм идентификации классов транспортных средств с помощью акселерометров // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5 (60). С. 15–18.
2. Обертов Д.Е. Спектральный анализ данных с акселерометров для задач обнаружения и идентификации транспортных средств // Научно-технический вестник ИТМО. 2012. № 6 (82). С. 44–50.
3. Обертов Д.Е., Бардов В.М. Определение параметров транспортного средства с использованием датчиков дорожного покрытия // Сб. тезисов докладов I Всероссийского конгресса молодых ученых (апрель 2012 г.). СПб., 2012. С. 196–197.
4. Обертов Д.Е., Бардов В.М. Алгоритм идентификации классов транспортных средств с помощью акселерометров // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 5 (60). – С. 15–18.

Конференции

1. Обертов Д.Е. Идентификация классов транспортных средств с помощью датчиков в дорожном покрытии // «Навигация и управление движением»: XIV конференция молодых ученых (март 2012 г., ЦНИИ «Электроприбор»).
2. Обертов Д.Е., Бардов В.М. Определение параметров транспортного средства с использованием датчиков дорожного покрытия // I Конгресс молодых ученых. Всероссийский конгресс (апрель 2012 г., НИУ ИТМО).

Литература

1. Birk W., Osipov E., Eliasson J., iRoad – cooperative road infrastructure systems for driver support // 16th ITS World Congress. – Stockholm, Sweden, 2009. P. 1–8.
2. Birk W., Osipov E. On the design of cooperative road infrastructure systems // Reglermote 2008. P. 349–355.
3. Birk W., Eliasson J., Lindgren P., Osipov E., Riliskis L. et al. Road surface networks technology enablers for enhanced ITS // 2010 IEEE vehicular networking conference (Jersey City, NJ, 13–15 December 2010). Piscataway, NJ, 2010. P. 152–159.
4. Hostettler R. Traffic counting using measurements of road surface vibrations: Master's thesis. Lulea University of Technology, 2009 (<http://pure.ltu.se/>).
5. Hostettler R., Birk W., Nordenvaad L.M. On the feasibility of road vibrations-based vehicle property sensing // (IET) Intelligent transport systems. 2010. Vol. 4. № 4. P. 356–364 (<http://pure.ltu.se/>).
6. Лем Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация. М., 1982. – 592 с.



Осипов Андрей Владимирович
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра вычислительной техники
E-mail: andrey@osipov-family.com

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ВЫСОКОНАДЕЖНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СЕТЯХ С ГЕТЕРОГЕННЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ МАГИСТРАЛЕЙ

А.В. Осипов

Научный руководитель – профессор В.А. Богатырев

Введение

Цель проекта – разработка и исследование алгоритмических, программных и аппаратных средств организации отказоустойчивых резервированных гетерогенных каналов связи.

Задачи проекта:

- анализ существующих методов построения отказоустойчивых вычислительных сетей;
- анализ существующих стандартов и рекомендаций для агрегирования линий передачи данных, а также фирменных решений производителей коммуникационного оборудования;
- исследование вариантов совместного использования нескольких магистралей в одной вычислительной сети;
- разработка способов организации передачи данных по разнотипным каналам вычислительной сети;
- разработка алгоритма организации передачи данных в вычислительной сети с гетерогенным резервированием магистралей;
- имитационное моделирование и численное сравнение характеристик вычислительных сетей, реализованных согласно рассмотренным стандартам и разработанным алгоритмам;
- построение аналитической модели надежности вычислительной сети с резервированием гетерогенных каналов;
- решение оптимизационной задачи для параметров алгоритма организации передачи данных в вычислительной сети с гетерогенным резервированием магистралей для различных внешних условий;
- разработка и реализация алгоритмов векторной оптимизации с помощью математических пакетов прикладных программ;
- анализ полученных результатов и выработка рекомендаций по интегрированию гетерогенных каналов в соответствии с результатами векторной оптимизации.

В ходе выполнения проекта были использованы методы теории вероятностей, комбинаторного анализа, теории случайных процессов, в частности Марковских теорий принятия решений, надежности, массового обслуживания, вычислительных систем, численных

методов, а также имитационного и аналитического моделирования, общих методов системного анализа.

Анализ существующих методов построения отказоустойчивых вычислительных сетей

Для проектирования вычислительных сетей актуальной является задача обеспечения высокого уровня отказоустойчивости и производительности. Современные вычислительные системы зачастую распределенные и большемасштабные. Например, суперкомпьютер «Jaguar» класса массивно-параллельных систем, размещенный в Национальном центре компьютерных исследований в Оук-Ридже, штат Теннесси (National Center for Computational Sciences (NCCS)) включает 26 520 автономных вычислительных ячеек. Современные беспроводные сенсорные сети, в основном базирующиеся на стандарте ZigBee, позволяют объединять до 65 000 узлов. Темпы роста масштабов и сложности современных вычислительных систем превосходят темпы роста показателей надежности применяемой при построении их элементной базы.

Традиционными стратегиями повышения надежности доставки сообщения (вероятности безошибочной и своевременной доставки сообщения адресату) являются: резервирование магистралей передачи данных, посылка более коротких кадров (сегментация исходных кадров на фрагменты), использование систем с переспросом (повторными пересылками), понижение скорости передачи (увеличение энергии на один бит, использование более сильных методов модуляции). Каждая из указанных стратегий имеет достоинства и недостатки. Для систем передачи данных целесообразно комплексное применение методов повышения надежности доставки, основанных на сегментации кадров, резервировании каналов и использовании оптимальной скорости передачи.

Анализ существующих стандартов и рекомендаций для агрегирования линий передачи данных

Необходимость координации усилий производителей сетевого оборудования в области агрегирования каналов привела к появлению ряда общепринятых стандартов [1].

Стандарт 802.3ad-2000 – «IEEE Standard for Information Technology – Local and Metropolitan Area Networks» – описывает подуровень агрегирования каналов для канального уровня сетей CSMA / CD и технологию объединения нескольких физических каналов в один логический. Объединение способствует не только значительному увеличению пропускной способности магистральных каналов «коммутатор – коммутатор» или «коммутатор – сервер», но и повышению надежности единого канала передачи данных. Он был принят в 2000 г., а до этого действовал стандарт EtherChannel, являющийся закрытой разработкой компании «Cisco». Для его реализации требуется соответствующая настройка всех коммутаторов. Однако плюс этой технологии в том, что EtherChannel поддерживает разные режимы посылки пакетов, тогда как 802.3ad – только стандартный.

Стандарт IEEE 802.3ad впоследствии был заменен на IEEE 802.1AX-2008 – «IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Link Aggregation». Он описывает возможности агрегирования каналов независимо от реализации уровня доступа к среде, то есть создание логических каналов, использующих N параллельных полнодуплексных каналов идентичной пропускной способности.

Примером использования этой технологии может служить сервер с восемью 1000-мегабитными сетевыми картами и свитч, объединяющий эти каналы в один восьмигигабитный канал. Такое решение с использованием стандарта 802.3ad намного дешевле, чем одна

десятигигабитная сетевая карта, но имеет ограничение: максимальная скорость, поддерживаемая стандартом, 8 Гб/с. Также может поддерживаться динамическое добавление адаптеров (Dynamic Adapter Membership), что позволяет подключать и отключать их из агрегированного адаптера без прерывания сервиса для пользователя.

Агрегация каналов используется не только в коммутаторах. Ее можно применять и к сетевым адаптерам. Агрегация устанавливается на уровне драйверов адаптера, то есть ниже уровня операционной системы. Для достижения максимальной эффективности все порты при агрегации должны быть одного типа. Например, с медным покрытием (CAT-5E/CAT-6), из оптоволокна одномодового (SM) или многомодового (MM) типов. Все порты должны действовать на одной скорости. Согласно стандарту 802.3ad смешивать порты с разной скоростью допустимо, однако скорость в каждом канале будет ограничена минимальным значением ее в одном из каналов.

Исследование вариантов совместного использования нескольких магистралей в одной вычислительной сети

Одновременное использование резервированных каналов способно повысить производительность и надежность вычислительной сети. Известен способ организации резервирования каналов с помощью агрегирования линий передачи данных в логические каналы, или транки. Существует множество разновидностей транкинговых систем, каждая из которых описывает свой метод доступа абонентов к общему набору каналов. Среди них существуют методы как с удержанием канала на весь сеанс связи, так и – на время одной передачи.

Одновременное использование нескольких каналов связано с вариантностью организации межмашинного обмена [2]. Очевидно, что реализация обмена при объединении в единую резервированную среду нескольких каналов требует исследования методов распределения этих каналов и оценки их эффективности.

В работе [1] рассмотрены варианты организации обмена при одновременном использовании нескольких магистралей. Они предусматривают предварительное фиксированное разделение магистралей между абонентами, выставление запроса на доступ ко всем магистралям с передачей кадров по первой из предоставленных и выставление запроса на доступ ко всем магистралям и передаче кадров по всем предоставленным. Варианты организации передачи через резервированные магистрали с учетом ненадежности их доставки рассматривались в работе [2], однако при этом исследования оптимальной сегментации сообщений не проводилось. Под сегментацией сообщения понимается разбивка протокольного блока данных от сетевого уровня на части, каждая из которых формируется для передачи в виде отдельного кадра (фрагмента) [3].

Разработка способов организации передачи данных по разнотипным каналам вычислительной сети

Использование нескольких физических каналов в одном сеансе передачи данных ведет к появлению вариантности организации обмена. Время передачи кадра может не совпадать в используемых физических каналах из-за разной пропускной способности. Даже если каналы полностью идентичны, время передачи может варьироваться из-за необходимости повторных пересылок в случае нарушения целостности кадра или возникновения коллизий в канале. Если при организации обмена через резервированные каналы не учесть вариацию времени передачи

кадра, то в порядке их следования могут возникнуть инверсии и, следовательно, невозможность восстановления исходного сообщения.

Риск появления инверсий исключается при организации резервированных магистралей методом ненагруженного резервирования. Однако такой подход, хотя и обеспечивает отказоустойчивость, является низкоэффективным с точки зрения использования пропускных способностей физических каналов и в рамках данных исследований не представляет интереса.

Функция распределения пакетов по физическим каналам может быть возложена на канальный уровень, протоколы которого способны взаимодействовать с одним или несколькими физическими уровнями, контролируя и управляя этим взаимодействием.

Благодаря непосредственному взаимодействию протоколов канального и физического уровней в алгоритмах работы протоколов канального уровня можно учесть характеристики физических каналов, предоставляющие интерес при распределении кадров по каналам, например величину задержки отправки, вероятность возникновения битовой ошибки, скорость передачи данных и т. д.

Организацию обмена по резервированным каналам предпочтительнее реализовывать на нижних уровнях также и потому, что на них можно возложить функции контроля надежности доставки. Обеспечение надежной доставки короткого кадра потребует меньших затрат (повторных пересылок, битов контрольных сумм, корректирующих групп и т. д.) по сравнению с отправкой целого сообщения без промежуточного контроля достоверности составляющих его кадров.

Использование канального уровня для организации резервированного обмена позволяет достичь существенно бо́льших значений эффективности использования пропускных способностей физических каналов. Однако для этого при распределении кадров по физическим каналам требуется учитывать характеристики этих каналов. Такое динамическое распределение приводит к возникновению инверсий в потоке кадров на принимающем узле.

С точки зрения сетевой модели OSI агрегирование каналов происходит под сетевым уровнем и над канальными уровнями каждого физического канала. Таким образом, подуровень агрегирования каналов использует сервисы нескольких канальных уровней физических линий, но и сам предоставляет сервисы канального уровня. Поэтому с точки зрения сетевых протоколов объединение происходит на канальном уровне, как представлено на рис. 1.

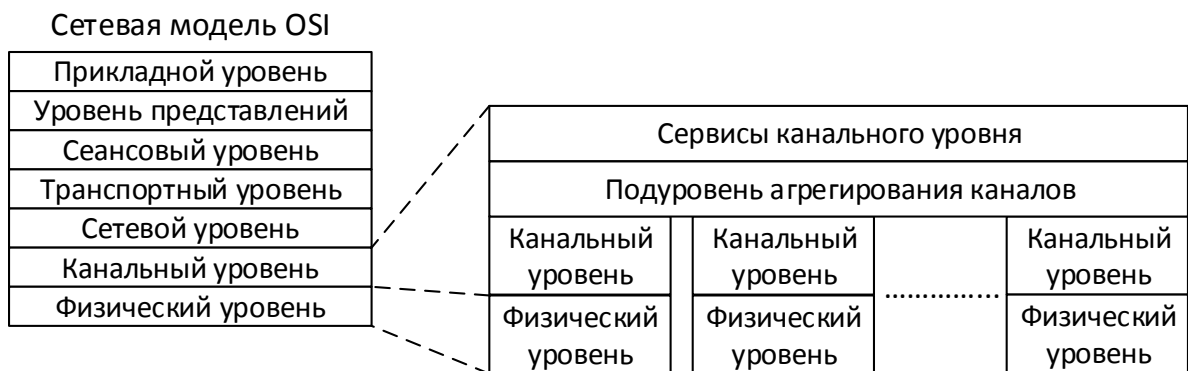


Рис. 1. Архитектурное расположение подуровня агрегирования каналов

Для повышения эффективности использования пропускных способностей физических каналов, а также для достижения отказоустойчивости процесса передачи одного сообщения без временных задержек требуется организация адаптивного распределения кадров по физическим каналам, которое должно учитывать текущие значения характеристик физических каналов. Это

в свою очередь может приводить к возникновению дубликатов и инверсий в потоке принятых кадров.

Разработка алгоритма организации передачи данных в вычислительной сети с гетерогенным резервированием магистралей

Существуют различные алгоритмы для распределения блоков данных по агрегированным каналам. Самый простой вариант организации передачи через агрегированные каналы – передача данных по одному из исправных физических соединений. В случае отказа используемого соединения передача продолжается по следующему исправному соединению. Данный подход, реализующий метод ненагруженного резервирования, обеспечивает отказоустойчивость, однако эффективность использования пропускной способности физических каналов далека от максимального значения.

Более эффективным с этой точки зрения является алгоритм распределения пакетов RoundRobin. В сети, функционирующей по данному алгоритму, пакеты, ожидающие отправки, передаются поочередно по каждому из физических каналов. Однако Round Robin – метод балансировки, который не сохраняет порядок пакетов, а лишь балансирует нагрузку по пакетам. Каждый следующий исходящий пакет передается через другой рабочий сетевой интерфейс независимо от времени доставки предыдущего. Доля инверсий в потоке принятых пакетов может быть низка только при агрегировании абсолютно идентичных физических каналов.

Особый алгоритм распределения блоков описан в RFC 1990 (Request for Comments) для использования в протоколе Multilink PPP (point-to-point protocol). Этот протокол может быть использован для агрегирования двух или более каналов передачи данных. Он допускает одновременное использование нескольких каналов для передачи кадров из разных сессий. Для контроля инверсий каждому кадру присваивается номер последовательности, что позволяет восстановить исходный порядок следования кадров после их получения. В рамках рекомендаций RFC 1990 агрегировать можно как отдельные физические каналы, так и мультиплексные (такие как ISDN, X.25 и Frame Relay). Кроме того агрегируемые физические каналы могут быть гетерогенными (например агрегирование коммутируемого синхронного и асинхронного соединения).

В работе [4] предложен адаптивный алгоритм RateBalance для распределения пакетов по физическим каналам передачи данных. В его основу положен следующий принцип: кадр передается по тому каналу, который доставит его раньше. Алгоритм выполняет распределение кадров по N доступным каналам, основываясь на оценке времени доставки кадра.

Стоит отметить, что существующие алгоритмы распределения кадров по каналам не реализуют адаптивный выбор схемы резервирования между отказоустойчивой схемой (режим «Broadcast» в драйвере ChannelBonding) и схемой повышения производительности (режим «Balance» в драйвере ChannelBonding).

В основу предлагаемого алгоритма (далее будем называть его DPB – delivery probability balancing) положен следующий принцип: кадр передается по тому каналу (или нескольким каналам одновременно), который осуществит его доставку не более чем за требуемое время с вероятностью не менее требуемой.

Алгоритм DPB в своей работе учитывает параметры сообщений, поступающих на отправку: время поступления сообщения (c) – t_0 ; длину сообщения (бит) – l и период, в течение которого сообщение должно быть доставлено (равен бесконечности, если для данного

сообщения период не регламентирован) – τ , а также параметры используемых физических каналов:

- функцию распределения величины задержки отправки кадра – $F(d)$;
- вероятность возникновения битовой ошибки в физическом канале – BER ;
- скорость передачи данных (бит/с) – r ;
- максимальную длину кадра – l_{max} ;
- имеющуюся очередь кадров и их параметры – $Q(t_0, l, \tau)$.

Распределитель блоков данных по алгоритму DPB схематично представлен на рис. 2.

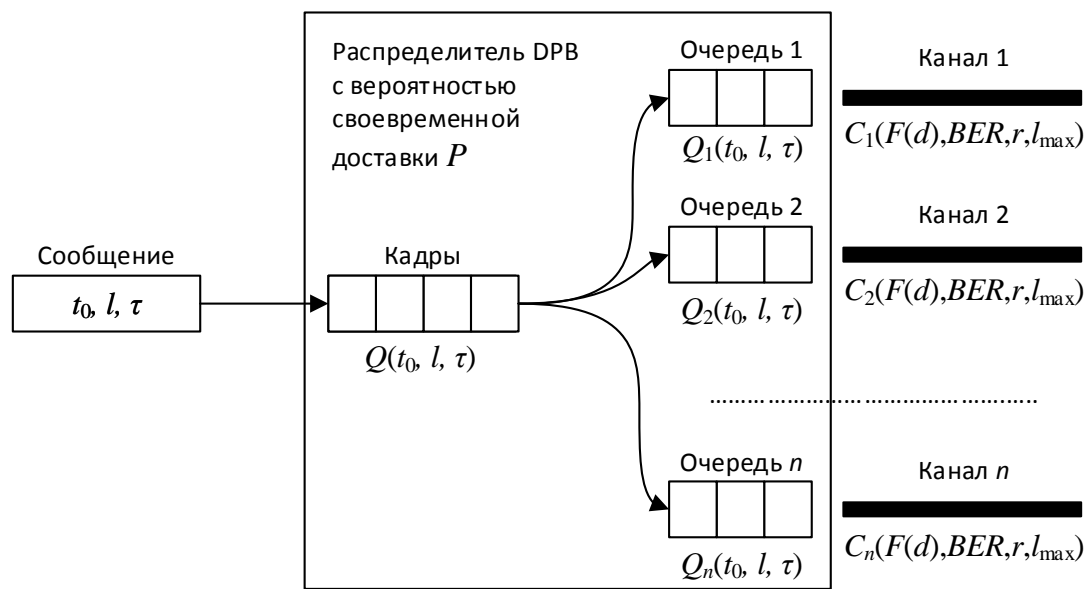


Рис. 2. Распределитель DPB

В результате обработки входных параметров алгоритм может при необходимости разбить передаваемое сообщение на кадры и затем для каждого из них принять решение поставить кадр:

- в конец очереди к одному из физических каналов;
- в середину или в начало очереди к одному из физических каналов;
- в начало нескольких физических каналов.

Алгоритм может пересматривать принятые решения после неудачной попытки доставки кадра и выбирать новый режим для повторной его пересылки.

Имитационное моделирование и численное сравнение характеристик реализованных вычислительных сетей

Для алгоритмов RoundRobin, RateBalance и DPB были построены имитационные модели с использованием библиотеки SimEvents пакета Matlab/Simulink. В рамках построенных моделей вычислительная сеть имеет три физических канала передачи данных с пропускными способностями соответственно 4800 бит/с, 9600 бит/с и 19200 бит/с. Сеть осуществляет передачу тестовых сообщений длиной 1024 бит. Имитационная модель представлена на рис. 3.

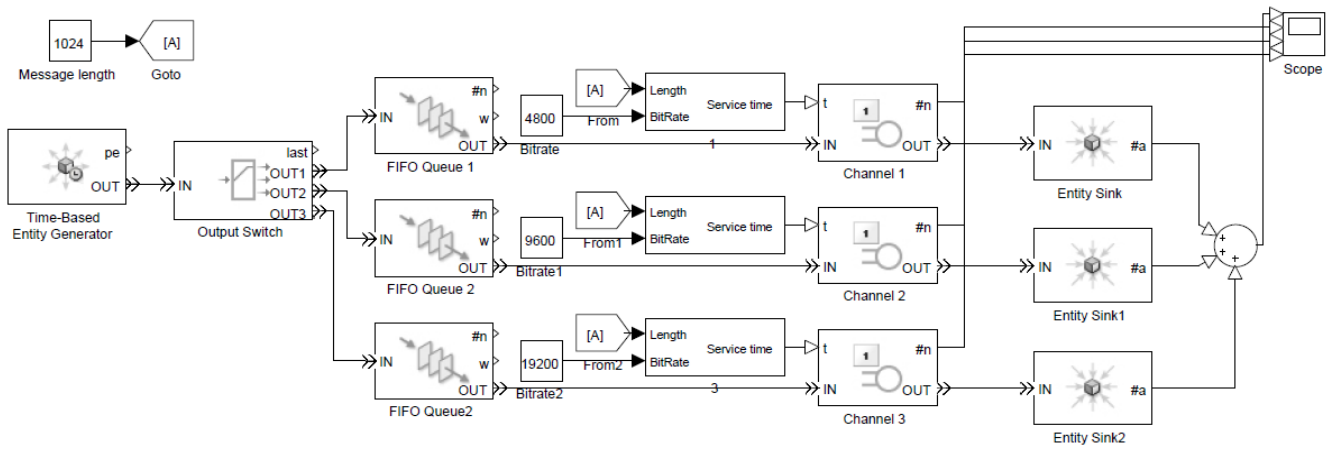


Рис. 3. Имитационная модель сети с тремя параллельными каналами

В ходе первого этапа имитационного моделирования измеряется число отправленных сообщений за 1 с работы сети. Результаты измерения приведены в Табл. 1.

Таблица 1

Сравнение числа отправленных сообщений алгоритмов

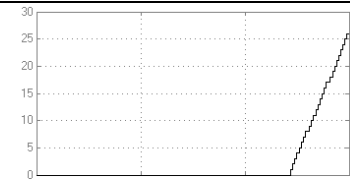
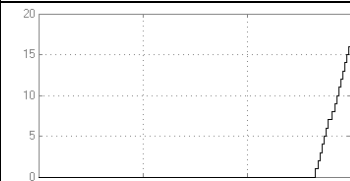
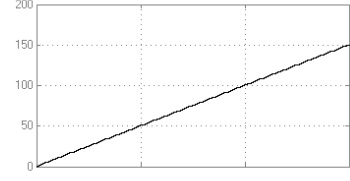
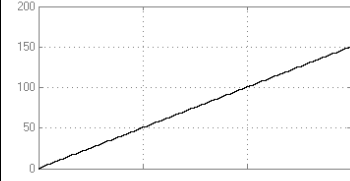
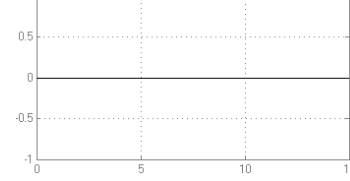
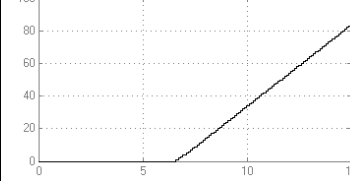
Критерий	Алгоритм RoundRobin	Алгоритм RateBalace	Алгоритм DPB
Число отправленных сообщений			
Использование полосы пропускания 1-го канала			
Использование полосы пропускания 2-го канала			
Использование полосы пропускания 3-го канала			
Число отправленных сообщений	16	31	31

Результаты имитационного моделирования показывают, что исследуемая вычислительная сеть, использующая алгоритм RoundRobin, обслуживает вдвое меньшее число заявок на отправку сообщений по сравнению с алгоритмами RateBalance и DPB.

В ходе второго этапа имитационного моделирования за время работы сети, равное 15 с, измеряется число сообщений, доставленных с опозданием. Модель учитывает, что алгоритм DPB способен переставить сообщение в начало очереди канала на отправку с целью минимизации вероятности недоставки сообщения в срок. Результаты второго этапа моделирования приведены в Табл. 2.

Таблица 2

Сравнение числа сообщений, не отправленных в срок

Критерий	Алгоритм RateBalance	Алгоритм DPB
Число сообщений, не отправленных в срок		
Общее число отправленных сообщений		
Число перестановок в очереди на отправку		
Число сообщений, не отправленных в срок	26	16

Благодаря осуществлению ранжирования сообщений алгоритму DPB удается сократить число сообщений, не отправленных в срок, до 16 шт, по сравнению с 26 при использовании алгоритма RateBalance.

Построение аналитической модели надежности вычислительной сети с резервированием гетерогенных каналов

В ходе исследований были рассмотрены следующие варианты организации обмена через резервированные магистрали при сегментации сообщений и без таковой с учетом повторных пересылок в случае потери передаваемых сообщений:

- для каждой магистрали существует строго определенный перечень устройств, использующих ее для отправки сообщений. Все магистрали назначены по таким перечням. Для приема сообщений каждое устройство прослушивает все магистрали;
- каждое сообщение разбивается на заранее определенные части, каждая из которых отправляется по своей магистрали;
- каждое сообщение отправляется по первой освободившейся магистрали или может быть отправлено по любой магистрали.

Эффективность вариантов организации каналов сравнивается по среднему времени пребывания требования в системе. При построении моделей многомагистральных систем будем предполагать показательное распределение интервалов между требованиями и времени их обслуживания. Такое допущение оправдано в случае, если сообщения передаются не по расписанию, а по факту регистрации события или получения команды.

Модели одновременного использования нескольких магистралей

- Первый случай

Для каждой магистрали существует строго определенный перечень устройств, использующих ее для отправки сообщений. Исходный поток требований распределяется

между m магистралями фиксированным, заранее определенным способом. Допустим, что каждая магистраль представляет собой независимую систему массового обслуживания (СМО). Такая организация доступа к магистралям может быть интерпретирована как совокупность СМО типа М/М/1.

Соответственно, для сообщения среднее время пребывания требования в системе определяется выражением [5]: $T_1 = \frac{t}{1 - t\lambda/m}$, где $t = \frac{1}{\mu}$ – среднее время, затрачиваемое на обслуживание одного требования (под временем обслуживания понимается промежуток времени, в течение которого требование находится в обслуживающем приборе); μ – интенсивность обслуживания; λ – интенсивность входного потока сообщений.

Достоинством данного способа является простота организации доступа к ресурсам – их разделение между устройствами фиксировано.

- Второй случай

Каждое сообщение разбивается на заранее определенные части, и $1/m$ -я часть его отправляется по своей магистрали. Среднее время обслуживания этой части меньше в m раз (интенсивность обслуживания больше в m раз) по сравнению с целым сообщением.

Разбивка сообщения на m частей увеличивает интенсивность входного потока в m раз, но эти m частей строго распределяются между m независимыми каналами (каждый из которых может быть интерпретирован как независимая СМО), тогда для такого канала интенсивность входного потока будет по-прежнему составлять λ .

Среднее время пребывания сообщения определяется максимальным временем пребывания части сообщения в одном из каналов, но так как сообщение разбивается на части равной длины, а каналы имеют идентичные характеристики (в рамках рассматриваемой модели), то время пребывания всех частей одинаково между собой и равно: $T_2 = \frac{t/m}{1 - t\lambda/m}$.

Достоинством данного способа является уменьшение среднего времени пребывания требования в системе. В сравнении с первым вариантом виден выигрыш во времени в m раз. Данная зависимость не учитывает повторные пересылки даже в случае потери части сообщения.

- Третий случай

Каждое сообщение отправляется по первой освободившейся магистрали (по любой).

Такая организация доступа к ресурсам может быть интерпретирована как СМО типа М/М/ m . Соответственно, среднее время пребывания требования в системе определяется, выражением [6]

$$T_3 = m / \mu + P_m / \mu(1 - \rho),$$

где

$$\rho = \frac{\lambda}{m\mu}, \quad p_k = \begin{cases} p_0 \frac{(m\rho)^k}{k!}, & k \leq m \\ p_0 \frac{(\rho)^k m^m}{m!}, & k > m \end{cases}, \quad p_0 = \left(\sum_{k=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^k}{k!} + \frac{(m\rho)^m}{m!} \frac{1}{1-\rho} \right)^{-1}, \quad P_m = \frac{p_0 (m\rho)^m}{(1-\rho)m!}.$$

На рис. 4 представлена зависимость среднего времени ожидания обслуживания для числа магистралей $m = 5$.

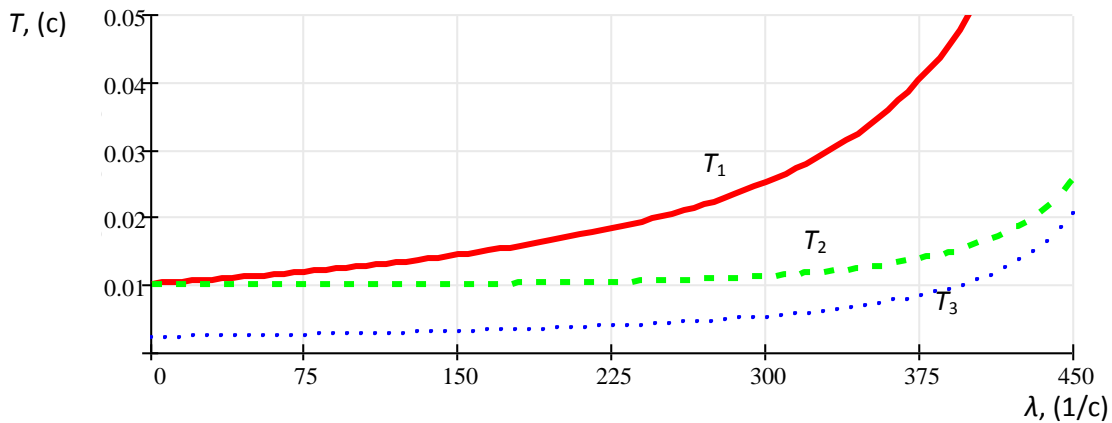


Рис. 4. Зависимость среднего времени пребывания требования в системе от интенсивности входного потока сообщений для трех вариантов организации использования магистралей

Из построенных моделей параллельных каналов видно, что первый вариант, предусматривающий фиксацию магистралей за узлами, уступает остальным по среднему времени ожидания обслуживания. Фиксация ресурсов за потребителями – низкоэффективный вариант с точки зрения пропускной способности сети. Этот вариант может быть применен в существующих сетях, где замена устройств или протоколов нецелесообразна, так как не требует изменения общепринятых стандартов и протоколов.

Решение оптимизационной задачи

Рассмотрим модель канала с сегментацией сообщения. В высоконадежном канале с точки зрения объема издержек информации рациональным является посылка сообщения без сегментации. В канале с высоким уровнем помех целесообразна посылка сообщения с разбивкой на r кадров, к каждому из которых присоединяется некоторый объем служебной информации. Сегментация позволяет снизить объем повторно передаваемой информации в случае возникновения ошибок при передаче. При разных уровнях вероятности битовой ошибки оптимальным являются различные значения числа кадров, на которые требуется разбить сообщение.

Рассмотрим модель передачи сообщения, использующую один канал и предусматривающую разбивку сообщения на r кадров. СМО, описывающая данную модель, – система с неординарным входящим потоком.

В рамках рассматриваемой модели с сегментацией объемы всех групп требований постоянны и равны r , где r – число кадров, на которое разбивается исходное сообщение. Это условие приводит к простейшей системе с неординарным входящим потоком, которая в точности соответствует системе $M/Er/1$.

Производящая функция вероятности того, что вновь поступившее требование застанет систему в состоянии k , при котором не выполнены k этапов, определяется формулой:

$$P(z) = \frac{r\mu(1-\rho)(1-z)}{r\mu + \lambda z^{r+1} - (\lambda + r\mu)z}$$

Математическое ожидание числа необслуженных этапов в системе определяется как значение первого момента производящей функции при $z=1$. Первый момент преобразующей функции после раскрытия неопределенности по правилу Лопиталья определяется, как

$$P'(z) = \frac{\mu\lambda(1-\rho)(1+r)}{2(\lambda - \mu)^2}$$

Тогда по формуле Литтла среднее время пребывания требования в системе (с учетом перехода от числа этапов к числу требований) определяется, как: $T_{Er} = P'(1)/r\lambda$.

Разбивка сообщения на кадры требует добавления к каждому кадру определенного объема служебной информации, что может привести к снижению пропускной способности сети и дополнительным задержкам при передаче сообщений. В такой модели интенсивность обслуживания имеет следующий вид: $\mu = 1/(t_0 + t_h \cdot r)$, где t_0 – время, необходимое для передачи полезных битов сообщения, t_h – время, необходимое для передачи служебных битов одного кадра.

Зависимости, построенные на основе модели среднего времени пребывания требования в системе, учитывающей изменение интенсивности потока обслуживания от числа кадров, представлены на рис. 5.

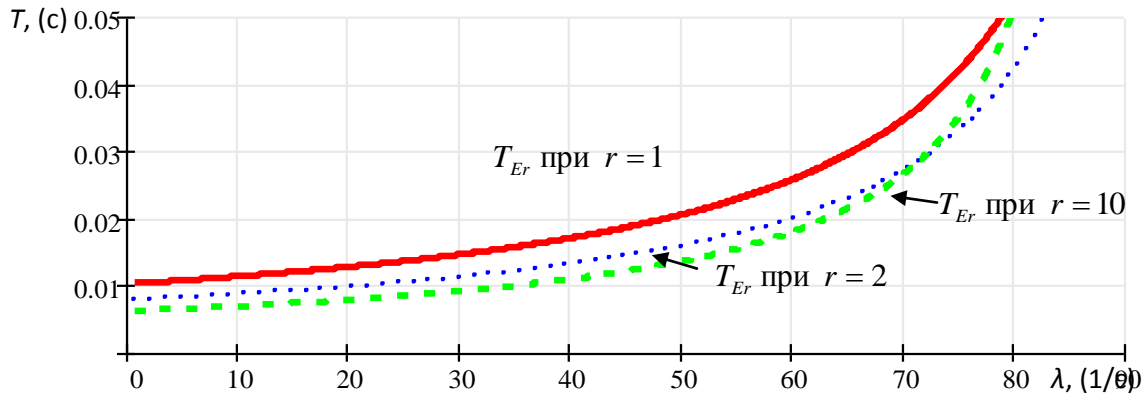


Рис. 5. Зависимость среднего времени пребывания требования в системе для моделей $M/Er/1$ при $r = 1$, $M/Er/1$ при $r = 2$, $M/Er/1$ при $r = 10$, при $t_0 = 10^{-2}$, $t_h = 10^{-4}$

Найдем оптимальное значение числа кадров в области низких значений интенсивности входного потока (стремящихся к нулю). Очевидно, что чрезмерное увеличение числа кадров приведет к большому объему служебной информации и не будет являться оптимальным вариантом с точки зрения среднего времени пребывания требования в системе. При $\lambda \rightarrow 0$ среднее время пребывания требования в системе определяется следующим образом:

$$T_{Er} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{P'(1)}{\lambda r} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\mu \lambda (1 - \lambda / \mu) (1 + r)}{2(\lambda - \mu)^2 \lambda r} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\mu (1 - \lambda / \mu) (1 + r)}{2(\lambda - \mu)^2 r} = \frac{1 + r}{2\mu r}$$

Подставив формулу для μ , получаем: $T_{Er} = (1 + r) \cdot (t_0 + t_h r) / 2r$.

Найдем минимум этой функции по r , для этого вычислим производную:

$$T'_{Er} = \frac{((1+r)(t_0 + t_h r))' \cdot 2r - (1+r)(t_0 + t_h r) \cdot (2r)'}{(2r)^2} = \frac{t_h r^2 - t_0}{2r^2}$$

Производная имеет экстремум в области допустимых значений r (т. е. $r \geq 1$) при $r = \sqrt{t_0 / t_h}$. Функция среднего времени пребывания требования в системе при $\lambda \rightarrow 0$ достигает своего минимума при $r = \sqrt{t_0 / t_h}$. Разумеется, количество кадров должно быть целым числом, ближайшим к $\sqrt{t_0 / t_h}$.

Графики на рис. 6 показывают, как сдвигается минимум среднего времени пребывания при увеличении интенсивности входного потока от числа кадров, равного $\sqrt{t_0/t_h}$, в сторону уменьшения числа кадров.

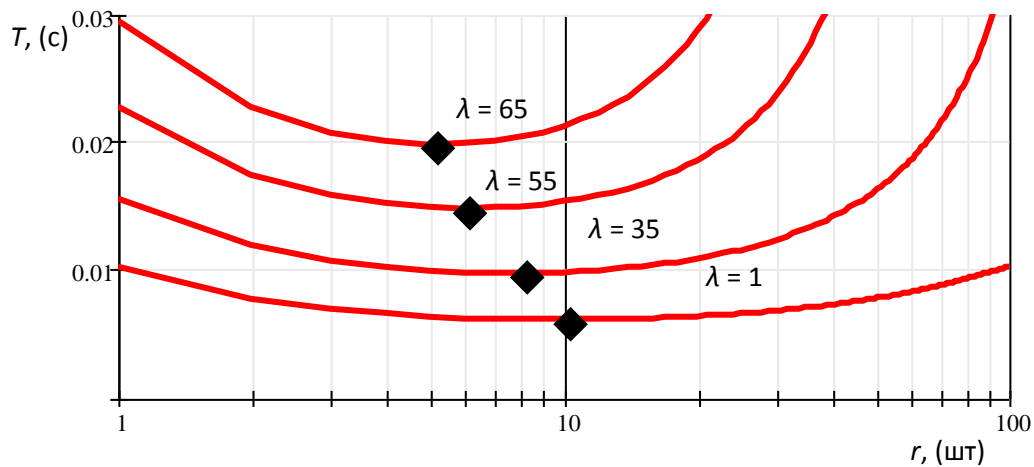


Рис. 6. Зависимость среднего времени пребывания требования в системе от интенсивности входного потока и количества кадров

Модель оптимизации скорости передачи

Скорость передачи сообщения влияет на значение вероятности битовой ошибки на приемнике сигнала [7]. Рассчитаем вероятность битовой ошибки в канале беспроводной связи для простейшего вида модуляции – амплитудной двухуровневой.

Средняя вероятность битовой ошибки составляет:

$$P_b = \frac{1}{2} P(e | s_1) + \frac{1}{2} P(e | s_2) = Q\left(\sqrt{\frac{2\varepsilon_b}{N_0}}\right),$$

где ε_b – энергия бита трансляции, равная произведению мощности на приемной антенне и продолжительности трансляции бита t_b , что определяется скоростью передачи данных;

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt, \quad x \geq 0.$$

Изменение времени трансляции одного бита влияет на интенсивность обслуживания следующим образом: $\mu = 1/(l \cdot t_b)$, где l – длина передаваемого сообщения в битах. На рис. 7 изображена зависимость интенсивности обслуживания от величины времени трансляции бита.

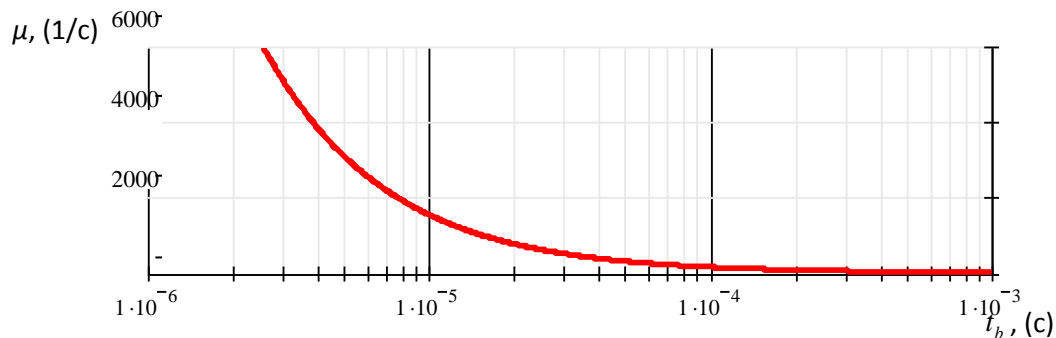


Рис. 7. Зависимость интенсивности обслуживания от величины времени трансляции бита

Вероятность успешной передачи одного сообщения a , являющаяся параметром производящей функции последовательности $g_i(2)$, определяется в соответствии с выражением: $a = (1 - P_b)^l$. Зависимость вероятности от времени трансляции бита представлена на рис. 8.

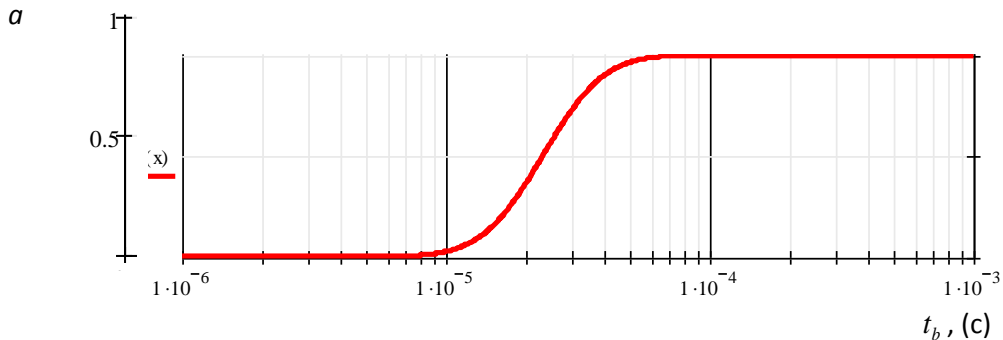


Рис. 8. Зависимость вероятности успешной передачи одного сообщения от величины времени трансляции бита

На рис. 9 представлены графики среднего времени пребывания требования в системе с учетом повторных пересылок в зависимости от времени трансляции одного бита. Данная модель учитывает изменение интенсивности обслуживания и изменение параметров неординарного входящего потока (из-за изменения вероятности успешной доставки сообщения).

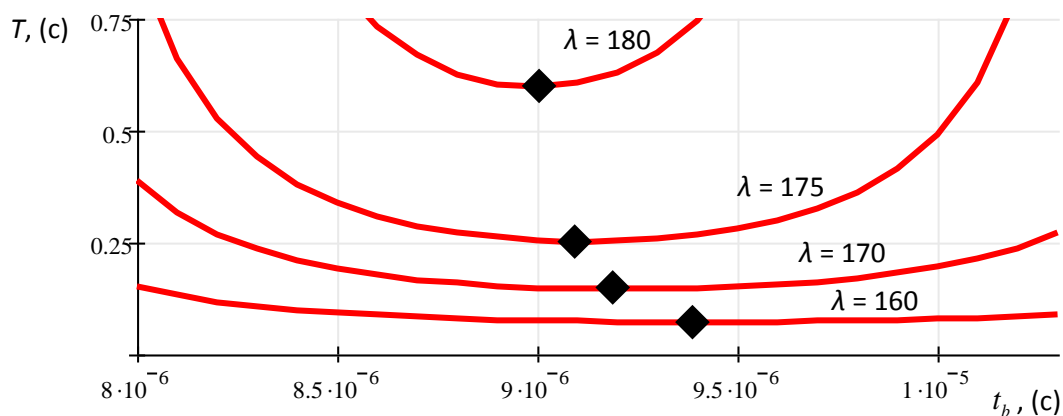


Рис. 9. Зависимость среднего времени пребывания требования в системе от интенсивности входного потока и величины времени трансляции бита

Оптимальное значение времени трансляции бита сдвигается в сторону уменьшения при росте интенсивности входного потока. Изменение значения времени трансляции в абсолютных величинах незначительно, однако относительная разница среднего времени пребывания в системе (для интенсивности входного потока $\lambda = 180$ 1/с) достигает 24,9 % при использовании $t_b = 9,4 \cdot 10^{-6}$ с вместо $t_b = 9,0 \cdot 10^{-6}$ с.

Разработка и реализация алгоритмов векторной оптимизации

В реальных задачах выбора наиболее предпочтительного решения, возникающих на практике, как правило, присутствуют несколько критериев оптимальности. Многокритериальная задача как модель задается в виде:

$$\begin{cases} F(x) \rightarrow \max \\ x \in D \end{cases},$$

где D – множество допустимых решений, $F(x)$ – векторная функция векторного аргумента x , которую можно представить как $F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\}$, где $f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)$ – скалярные функции векторного аргумента x , каждая из которых является математическим выражением одного критерия оптимальности.

Аргументами для исследуемой многокритериальной задачи оптимизации являются: параметр сегментации – число кадров, на которые разбивается исходное сообщение – r (шт) и битовая скорость передачи – br (бит/с).

К скалярным критериям оптимизации модели относятся: среднее время ожидания обслуживания требования в системе – T (с) и вероятность успешной доставки сообщения с первой попытки – a .

Условные обозначения и исходные значения:

- длина передаваемого сообщения (бит): $l = 256$;
- интенсивность входящего потока сообщений (1/с): $\lambda = 20$;
- длина заголовка, присоединяемого к каждому кадру (бит): $l_h = 16$;
- мощность сигнала на приемной антенне (Вт): $P = 10^{-5}$;
- спектральная плотность шумов на приемной антенне (Дж): $N_0 = 10^{-10}$.

Вероятность битовой ошибки, как было показано ранее, определяется выражением:

$$P_b(br) = Q\left(\sqrt{\frac{2P}{N_0} \frac{br}{l_h}}\right),$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad x \geq 0.$$

где

Вероятность успешной передачи всего сообщения с первой попытки составляет:

$$a(br, l) = (1 - P_b(br))^l.$$

Интенсивность обслуживания системы с повторными пересылками определяется, как:

$$\mu(r, l, br) = \frac{br}{l_h r + l}.$$

Производящая функция вероятности нахождения системы в состоянии k :

$$P(z, l, br, \lambda, r) = \frac{\mu(r, l, br) \left(1 - \frac{\lambda}{\mu(r, l, br)}\right)}{\mu(r, l, br) - \frac{\lambda z}{1 - z + a(br, l)z}}.$$

Среднее время ожидания обслуживания требования в системе в соответствии с формулой Литтла:

$$T(l, br, \lambda, r) = \frac{\frac{d}{dz} P(1, l, br, \lambda, r)}{r\lambda}.$$

Для решения векторной задачи оптимизации определим мультипликативный критерий:

$$F(l, br, \lambda, r) = \frac{a(br, l)}{T(l, br, \lambda, r)}$$

Поверхность, описывающая значения целевой функции в зависимости от битовой скорости и параметра сегментации, представлена на рис. 10.

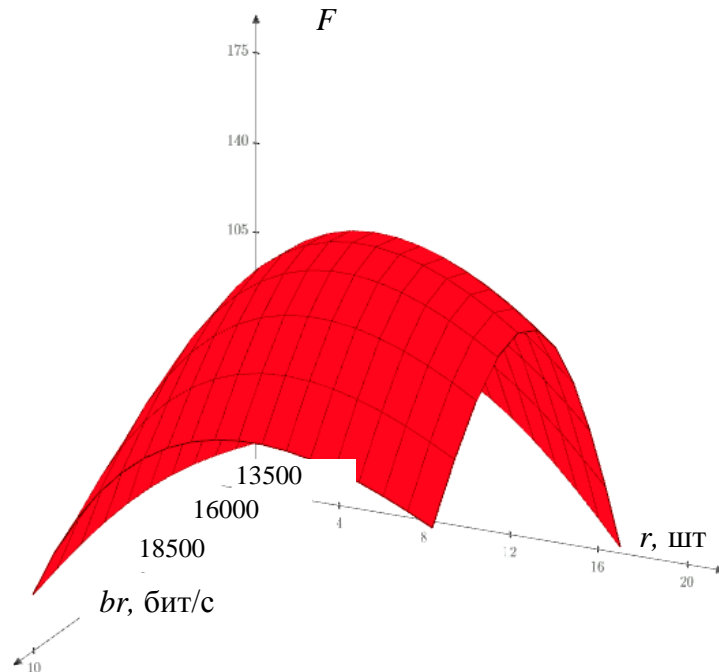


Рис. 10. Зависимость значения целевой функции от битовой скорости передачи и параметра сегментации

Оптимальное значение целевой функции, равное 142,293 при выбранных исходных значениях параметров, достигается при $br = 16677$ бит/с и $r = 11$ кадров.

Анализ полученных результатов и выработка рекомендаций

Агрегирование физических каналов передачи данных позволяет повысить надежность и пропускную способность канала при меньших финансовых затратах по сравнению с одним каналом идентичной пропускной способности.

Существуют общепринятые стандарты для объединения физических каналов в один логический. Также существуют и разнообразные алгоритмы распределения информационных блоков по физическим каналам (то есть способы организации передачи данных по нескольким каналам). Разработанные модели могут быть использованы для оптимальной организации передачи данных по резервированным каналам, так как позволяют оценивать варианты использования параллельных каналов для повышения надежности своевременной доставки пакета.

При объединении магистралей разного типа, предполагающих использование различных протоколов множественного доступа (например, случайных или детерминированных) встает вопрос об их интеграции. При таком объединении следует учитывать, что разные физические среды имеют свои особенности, например, для беспроводных каналов существуют проблемы «скрытой станции» и «засвеченной станции».

В процессе выполнения проекта разработаны:

- имитационные модели вычислительных сетей с резервированием магистралей на базе MATLAB /Simulink,
- алгоритм DPB организации передачи данных вычислительной сети с гетерогенным резервированием магистралей,
- аналитическая модель вычислительной сети с резервированием каналов различной физической природы,
- модели надежности и производительности вычислительной сети с интегрированием разнотипных каналов,
- векторная модель оптимизации вычислительной сети с интегрированием разнотипных каналов,
- рекомендации по интегрированию каналов различной природы в соответствии с результатами векторной оптимизации и имитационного моделирования.

Задача обеспечения высокого уровня отказоустойчивости и производительности актуальна для широкого класса вычислительных систем, обеспечивающих высокую надежность доставки сообщения (системы сбора данных, автоматики, телемеханики).

Существующие решения сетевых технологий предоставляют широкий выбор устройств, позволяющих подобрать конфигурацию для решения большого круга задач. Если требуется достичь наилучших показателей работы сети (например, максимизировать пропускную способность и надежность доставки сообщений), следует использовать устройства, позволяющие максимально полно настраивать параметры функционирования узлов (например, формат кадра, скорость передачи и пр.). Для определения этих параметров функционирования могут использоваться алгоритмы и модели, разработанные в ходе данных исследований.

Повышение надежности доставки сообщения за счет использования оптимальной организации обмена позволит использовать менее дорогостоящее оборудование без ухудшения показателей производительности сети.

Публикации

1. Богатырев В.А., Евлахова А.В., Котельникова Е.Ю., Богатырев С.В., Осипов А.В. Организация межмашинного обмена при резервировании магистралей // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. Вып. 2 (72). С. 171.
2. Осипов А.В., Богатырев В.А. Варианты объединения разнотипных каналов вычислительной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Вып. 2 (78). С. 145.
3. Осипов А.В. Расчет надежности передачи пакета данных между двумя узлами сети ZigBee // Сб. трудов молодых ученых и сотрудников кафедры ВТ. СПб., 2011. С. 55–59.
4. Осипов А.В. Применение беспроводных технологий для задач мониторинга в северных территориях России // Перспективы развития северных территорий России: Социально-экономический аспект: Сб. трудов межвузовской научно-практической конференции. Ч. 2. СПб., 2011. С. 252–256.
5. Осипов А.В. Исследование вариантов сегментации пакетов в каналах с высоким уровнем помех // Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami – 2011». 2011. Vol. 53. Nowoczesne informacyjne technologie. С. 24–26.

6. Осипов А.В., Фролова Н.И. Оптимальная сегментация пакетов в беспроводных сетях // XL Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. VIII. СПб., 2011. С. 148–150.
7. Осипов А. В. Моделирование энергопотребления чипсетов беспроводной связи // Региональные аспекты инновационного развития сферы сервиса в современных условиях: Сб. материалов IX научно-практической конференции студентов и аспирантов (с международным участием). Т. II. СПб., 2011. С. 143–145.
8. Осипов А.В. Моделирование потребления энергии чипсетами Bluetooth, UWB, ZigBee и Wi-Fi // Исследования молодежи – экономике, производству, образованию. II Всероссийская молодежная научно-практическая конференция (Сыктывкар, Сыктывкарский лесной институт, 20–21 апреля 2011 г.): Сб. материалов. Сыктывкар, 2011. С. 77–79.
9. Осипов А.В., Фролова Н.И. Задача оптимизации при сегментации пакетов в беспроводных сетях // Сб. трудов молодых ученых и сотрудников кафедры ВТ. Вып. 3. СПб., 2012. С. 44–46.

Литература

1. Богатырев В.А., Евлахова А.В., Котельникова Е.Ю., Богатырев С.В., Осипов А.В. Организация межмашинного обмена при резервировании магистралей // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 2. С. 171.
2. Осипов А.В., Богатырев В.А. Варианты объединения разнотипных каналов вычислительной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 145.
3. Таненбаум Э. Компьютерные сети. 5-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 960 с.
4. Поляков А.Ю. Адаптивный подход к распределению информационных блоков по каналам передачи данных // Электросвязь. 2009. № 6. С. 32–35.
5. Клейнрок Л., Теория массового обслуживания. Пер. с англ. / Пер. И.И. Грушко; ред. В.И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
6. Клейнрок Л., Вычислительные системы с очередями. Пер. с англ. под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
7. Прокис Д. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.



Петрик Александра Игоревна
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: aleksa_live@mail.ru

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С НЕГОЛОНОМНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ В ДИНАМИЧЕСКОМ ОКРУЖЕНИИ

А.И. Петрик

Научный руководитель – доцент Г.И. Болтунов

Введение

В настоящее время в мире интенсивно расширяются области исследований и использования мобильных колесных роботов. Они характеризуются развитым взаимодействием с внешними объектами, расширенными возможностями приспособления к сложной, неопределенной и подвижной внешней среде, высокой функциональной гибкостью и маневренностью.

Мобильные роботы нашли свое применение во многих сферах человеческой деятельности. В последние 20 лет во многих странах начали проводить соревнования различного уровня между мобильными роботами. В России мероприятие подобного рода впервые прошло в 1999 г. в Москве в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова – фестиваль «Мобильные роботы» имени профессора Е.А. Девянина.

В основе регламента, разработанного для этих соревнований, лежит идея задания маршрута движения робота с помощью активных маяков. Их использование позволяет ставить перед роботом разнообразные задачи, сложность которых может варьироваться в широких пределах, например от простого наведения на маяк до маневрирования между группой активных маяков. Каждый год в регламент соревнований включаются все более сложные задачи, требующие более сложных алгоритмов управления.

Данный кандидатский проект – продолжение дипломной работы «Разработка алгоритмов управления в задаче ориентации колесных роботов», посвященной разработке методов и алгоритмов управления и ориентации мобильных роботов в условиях неопределенности в задании траектории движения.

Целью работы является разработка методики построения алгоритмов управления движением механических систем с неголономными ограничениями в динамическом окружении.

Работа предполагает решение следующих задач:

- вывод и анализ математических моделей мобильных колесных роботов в задачно-ориентированных координатах;
- разработка алгоритмов управления движением мобильного колесного робота, находящегося в сложном динамическом окружении, в частности решение задачи слежения за подвижной экзосистемой в условиях, когда параметры ее движения не известны;
- анализ математических моделей замкнутой системы управления движением мобильных колесных роботов, находящихся в динамическом окружении;

- разработка методики построения алгоритмов управления движением механическими системами с неголономными ограничениями в динамическом окружении;
- разработка пакета прикладных программ, позволяющих исследовать различные варианты алгоритмов управления механическими системами с неголономными ограничениями в динамическом окружении;
- математическое моделирование и апробация полученных результатов при проведении вычислительных экспериментов.

Математическая модель мобильного колесного робота

Решение задачи проектирования современной системы управления колесного робота предполагает наличие адекватной математической модели, которая с одной стороны достаточно полно описывает поведение робота в процессе его передвижения в рабочем пространстве, с другой – пригодна для осуществления процедуры синтеза алгоритмов управления.

Математическая модель строится исходя из следующих предположений:

- платформа и колеса являются абсолютно твердыми, робот движется вдоль горизонтальной плоскости;
- каждое колесо остается в вертикальном положении и вращается вокруг своей горизонтальной оси без проскальзывания, контакт колеса и опорной поверхности является точечным;
- влияние флюгерного колесного модуля на динамику робота пренебрежительно мало.

Платформа (основание) подвижного робота рассматривается как твердое тело в абсолютной декартовой системе координат $Y = R^2$. Ее положение на плоскости в соответствии с рис. 1 однозначно определяется вектором $y = \text{col}(y_1, y_2)$ координат точки C (центра масс или полюса платформы) в абсолютной (фиксированной) системе координат OY_1Y_2 и углом α ориентации оси CZ_1 системы координат робота CZ_1Z_2 , связанной с платформой [1].

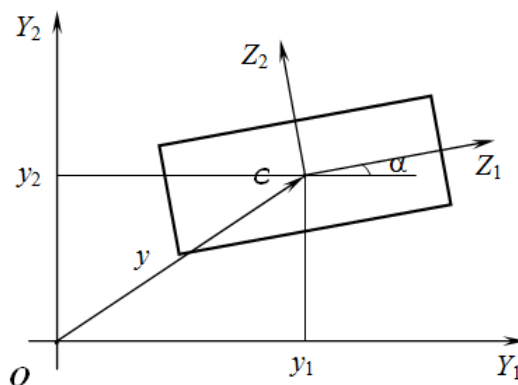


Рис. 1. Подвижный робот в абсолютной координатной системе

Для анализа скоростных и силомоментных переменных в относительной координатной системе Z , связанной с движущейся платформой, введем в рассмотрение ортогональную матрицу [1]

$$T(\alpha) = \begin{bmatrix} \tau_1^T(\alpha) \\ \tau_2^T(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрица $T(\alpha)$ образована единичными взаимно-ортогональными векторами $\tau_1(\alpha), \tau_2(\alpha)$, которые представляют подвижный базис робота, следовательно,

$$T(\alpha)T^T(\alpha) = I_2. \quad (2)$$

Ортогональная матрица $T(\alpha)$ удовлетворяет также следующему дифференциальному уравнению:

$$\dot{T}(\alpha) = \dot{\alpha}ET(\alpha), \quad (3)$$

где E – кососимметрическая матрица:

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим систему координат мобильного робота с двумя приводными модулями и одним флюгерным колесным модулем в соответствии с рис. 2.

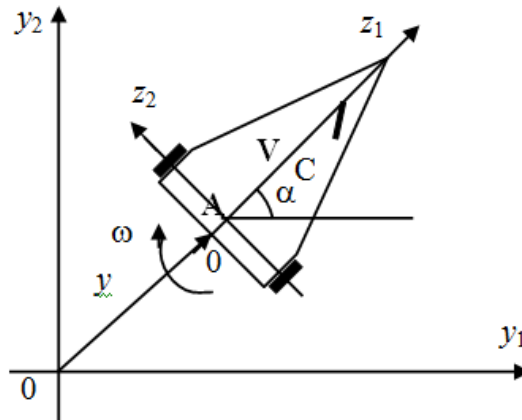


Рис. 2. Система координат мобильного робота

Связи между вектором линейной скорости $V = [V_1 \ V_2]^T$ центра масс C , угловой скоростью ω вращения подвижной платформы и вектором линейной скорости $V^j = [V_1^j \ V_2^j]^T$ центра j -го ($j = 1, 2$) приводного колесного модуля определяются уравнением (скорости даны в системе координат $A, z1, z2$):

$$V^j = [V_1^j \ V_2^j]^T = V + \omega E^T z^j, \quad (4)$$

учитывая, что $z^1 = (0, d)$ а $z^2 = (0, -d)$, d – середина расстояния между колесами

$$\begin{bmatrix} V_1^1 \\ V_2^1 \end{bmatrix} = V + \omega \begin{bmatrix} -d \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 - \omega d \\ V_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} V_1^2 \\ V_2^2 \end{bmatrix} = V + \omega \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 + \omega d \\ V_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Связь между вектором скорости $\dot{y} = \text{col}(\dot{y}_1, \dot{y}_2)$, заданным в абсолютной системе координат (O, y_1, y_2) , и вектором V определяется соотношением [2]:

$$\dot{y} = T^T(\alpha)V. \quad (7)$$

Вывод математической модели движения робота, как уже было сказано, осуществляется при условии отсутствия скольжения колес. Используя соотношение (4), условие отсутствия поперечного скольжения колес можно представить в виде:

$$GR(\alpha)\dot{x} = 0, \quad (8)$$

$$\text{где } G = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad \dot{x} = \begin{vmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{\alpha} \end{vmatrix}, \quad R(\alpha) = \begin{vmatrix} T(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Таким образом, существуют такие переменные v_1 и v_2 , с которыми в любой момент времени выполняется равенство:

$$\begin{vmatrix} V \\ \omega \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} v_1 \\ v_2 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

и, следовательно, геометрические свойства движения рассматриваемого колесного робота определяются уравнениями [3]:

$$\dot{x} = R^T(\alpha)Bv, \quad \dot{\theta} = r^{-1}T^T Bv, \quad (10)$$

где $B = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$, $T^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d \\ 1 & 0 & d \end{bmatrix}$, $v = \begin{vmatrix} v_1 \\ v_2 \end{vmatrix}$, $r = \text{diag}(r_1, r_2)$ – диагональная матрица, составленная из радиусов колес.

Допустим, на робота установлены два электродвигателя постоянного тока, которые обеспечивают вращение ведущих колес платформы. Электрическая подсистема содержит два контура с током, следовательно, вектор обобщенных координат электромеханической подсистемы $z = \text{col}(y, \alpha, \theta, e)$ содержит заряды e_1, e_2 , при этом $\dot{e}_j = i_j$ представляют собой токи, протекающие во внешних цепях питания соответствующих двигателей.

По-прежнему считаем, что движение колес происходит без проскальзывания, что приводит к уравнениям неголономных связей:

$$J(q)\dot{z} = 0,$$

где матрица $J(q)$ имеет вид [2]:

$$J(q) = \begin{bmatrix} T^T R(\alpha) & -r & 0 & 0 & 0 \\ T^T R(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{где } T^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Рассматриваемая электромеханическая система имеет четыре степени свободы. При условии $q \in V_z \subset M_z$ существует такая функция $v = \text{col}(v^j) \in R^2$, что

$$\dot{z} = G_q v = \begin{bmatrix} R^T(\alpha)B & 0 \\ r^{-1}T'B & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}. \quad (12)$$

В качестве компонент функции v удобно выбрать величину $V = \dot{y}_1 \cos \alpha + \dot{y}_2 \sin \alpha$ скорости точки A в соответствии с рис. 2, угловую скорость платформы $\omega = \dot{\alpha}$, токи $i_1 = \dot{e}_1$, $i_2 = \dot{e}_2$ во внешних цепях электродвигателей. Тогда уравнения (10) в скалярной форме имеют вид:

$$\dot{y}_1 = V \cos \alpha, \quad \dot{y}_2 = V \sin \alpha, \quad \dot{\alpha} = \omega, \quad (13)$$

$$\theta_1 = \frac{V - d\omega}{r}, \quad \theta_2 = \frac{V + d\omega}{r}, \quad \dot{e}_1 = i_1, \quad \dot{e}_2 = i_2. \quad (14)$$

Подсчитаем кинетическую энергию системы:

$$L = K + K_1 + K_2, \quad (15)$$

где кинетическая энергия K платформы робота определяется из выражения

$$K = \frac{1}{2}(m\dot{y}^T \dot{y} + J\dot{\alpha}^2), \quad (16)$$

K_j – кинетическая энергия j -го ($j = 1, 2$) колесного модуля

$$K_j = \frac{1}{2}(m_j \dot{y}_j^T \dot{y}_j + J_{jz} \dot{\alpha}^2 + J_{jy} \dot{\theta}_j^2). \quad (17)$$

Здесь m_j – суммарная масса ведущего колеса и ротора электродвигателя, J_{jz} – момент инерции ведущего колеса относительно вертикальной оси, $J_y = J_{jy} + n^2 J_{ry}$ – «приведенный» момент инерции колеса, J_{jy} – момент инерции колеса относительно горизонтальной оси, J_{ry} – момент инерции ротора электродвигателя, n – передаточное число редуктора [3].

$$K = \left(\frac{1}{2}m + m_j \right) (\dot{y}_1^2 + \dot{y}_2^2) - 2m_j a (\dot{y}_1 \sin \alpha - \dot{y}_2 \cos \alpha) \dot{\alpha} - 2m_j d (\dot{y}_1 \cos \alpha + \dot{y}_2 \sin \alpha) \dot{\alpha} + \left(\frac{1}{2}J + m_j a^2 + m_j d^2 + J_{jz} \right) \dot{\alpha}^2 + J_y (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2), \quad (18)$$

где a – расстояние от точки A до центра масс C в соответствии с рис. 2.

Магнитную энергию зададим в виде:

$$W_m = \frac{1}{2} i^T L i + c n \theta^T i, \quad (19)$$

где L – обобщенная индуктивность цепи электродвигателя, c – коэффициент электромеханического взаимодействия, R – омическое сопротивление цепи ротора, силы трения не учитываются, $\theta = \text{col}(\theta_1, \theta_2)$.

Потенциальная и электрическая энергии равны нулю, поэтому лагранжиан рассматриваемой электромеханической системы определяется суммированием только кинетической и магнитной энергий:

$$L = \left(\frac{1}{2}m + m_j \right) (\dot{y}_1^2 + \dot{y}_2^2) - 2m_j a (\dot{y}_1 \sin \alpha - \dot{y}_2 \cos \alpha) \dot{\alpha} - 2m_j d (\dot{y}_1 \cos \alpha + \dot{y}_2 \sin \alpha) \dot{\alpha} + \left(\frac{1}{2}J + m_j a^2 + m_j d^2 + J_{jz} \right) \dot{\alpha}^2 + J_y (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) + \frac{1}{2}L(\dot{e}_1^2 + \dot{e}_2^2) + c n (\theta_1 \dot{e}_1 + \theta_2 \dot{e}_2). \quad (20)$$

Вектор обобщенных сил включает сторонние ЭДС U_1 , U_2 , приложенные к электродвигателям:

$$Q = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ U_1 \ U_2)^T. \quad (21)$$

Принимая во внимание (12), (20), (21), получаем динамические уравнения движения робота:

$$\begin{aligned} m_0 \dot{V} - 2m_j d \dot{\omega} - \frac{cn}{r} (i_1 + i_2) &= 0, \\ -2m_j d \dot{V} + J_0 \dot{\omega} + 2m_j a V \omega + \frac{cnd}{r} (i_1 - i_2) &= 0, \\ L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 + \frac{nc}{r} (V - d\omega) &= U_1, \\ L \frac{di_2}{dt} + Ri_2 + \frac{nc}{r} (V + d\omega) &= U_2, \end{aligned} \quad (22)$$

где $m_0 = m + 2m_j + 4\frac{J_y}{r^2}$, $J_0 = J + 2m_j a^2 + (m_0 - m)d^2 + 2J_{jc}$.

После элементарных преобразований первых двух уравнений получим следующую систему динамических уравнений движения робота:

$$\begin{aligned} (4m_j^2 d^2 - J_0 m_0) \dot{V} - 4m_j^2 da V \omega + \frac{J_0 cn}{r} (i_1 + i_2) - \frac{2d^2 m_j cn}{r} (i_1 - i_2) &= 0, \\ (J_0 m_0 - 4m_j^2 d^2) \dot{\omega} + 2m_0 m_j a V \omega - \frac{2dm_j cn}{r} (i_1 + i_2) + \frac{dm_0 cn}{r} (i_1 - i_2) &= 0, \\ L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 + \frac{cn}{r} (V - d\omega) &= U_1, \\ L \frac{di_2}{dt} + Ri_2 + \frac{cn}{r} (V + d\omega) &= U_2. \end{aligned} \quad (23)$$

Последние два уравнения в (23) описывают переходные процессы в цепях электродвигателя.

Углы поворотов ведущих колес θ_1 , θ_2 и заряды e_1 , e_2 не входят в уравнения (23), поэтому из кинематических уравнений (12), (13) для дальнейшего рассмотрения оказываются существенными только уравнения (13):

$$\dot{y}_1 = V \cos \alpha, \quad \dot{y}_2 = V \sin \alpha, \quad \dot{\alpha} = \omega.$$

В системе удобно ввести новые токи и напряжения:

$$i_\sigma = i_1 + i_2, \quad i_\delta = i_2 - i_1, \quad U_\sigma = U_1 + U_2, \quad U_\delta = U_2 - U_1.$$

Уравнения для новых переменных i_σ, i_δ получаются соответственно суммированием и вычитанием двух последних уравнений системы (23):

$$\begin{aligned} (J_0 m_0 - 4m_j^2 d^2) \dot{V} &= -4m_j^2 da V \omega + \frac{J_0 cn}{r} i_\sigma + \frac{2m_j d^2 cn}{r} i_\delta, \\ (J_0 m_0 - 4m_j^2 d^2) \dot{\omega} &= -2m_0 m_j a V \omega + \frac{2m_j dcn}{r} i_\sigma + \frac{m_0 dcn}{r} i_\delta, \\ L \frac{di_\sigma}{dt} &= -Ri_\sigma - \frac{2cn}{r} V + U_\sigma, \\ L \frac{di_\delta}{dt} &= -Ri_\delta - \frac{2dcn}{r} \omega + U_\delta. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, математическая модель колесного робота имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= V \cos \alpha, \dot{y}_2 = V \sin \alpha, \dot{\alpha} = \omega, \\ (J_0 m_0 - 4m_j^2 d^2) \dot{V} &= -4m_j^2 daV\omega + \frac{J_0 cn}{r} i_\sigma + \frac{2m_j d^2 cn}{r} i_\delta, \\ (J_0 m_0 - 4m_j^2 d^2) \dot{\omega} &= -2m_0 m_j aV\omega + \frac{2m_j dcn}{r} i_\sigma + \frac{m_0 dcn}{r} i_\delta, \\ L \frac{di_\sigma}{dt} &= -Ri_\sigma - \frac{2cn}{r} V + U_\sigma, \\ L \frac{di_\delta}{dt} &= -Ri_\delta - \frac{2dcn}{r} \omega + U_\delta. \end{aligned} \quad (25)$$

Синтез алгоритма управления

Введем в рассмотрение задачно-ориентированные координаты робота:

- $\sigma = \alpha - \alpha^*$ – угловое отклонение (ошибка угловой ориентации),
- $\sigma = V(t) - V^*(t)$ – ошибка по скорости продольного перемещения,

где α^* – желаемая ориентация робота, $V^*(t)$ – желаемая линейная скорость движения робота в соответствии с рис. 2.

Задача управления заключается в стабилизации угловой ориентации робота $\delta = 0$ и поддержании заданной постоянной скорости продольного перемещения $\sigma = V(t) - V^* = 0$.

Электромеханическая модель робота имеет следующий вид:

$$\dot{y}_1 = V \cos \alpha, \dot{y}_2 = V \sin \alpha, \dot{\alpha} = \omega, \quad (26)$$

$$\dot{V} = -a_{V\omega} V\omega + a_{V\sigma} i_\sigma + a_{V\delta} i_\delta, \quad (27)$$

$$\dot{\omega} = -a_{\omega V} V\omega + a_{\omega\sigma} i_\sigma + a_{\omega\delta} i_\delta, \quad (28)$$

$$\frac{di_\sigma}{dt} = -a_{\sigma V} V - a_{\sigma\sigma} i_\sigma + b_\sigma U_\sigma, \quad (29)$$

$$\frac{di_\delta}{dt} = -a_{\delta\omega} \omega - a_{\delta\delta} i_\delta + b_\delta U_\delta, \quad (30)$$

где $y = \text{col}(y_1, y_2)$ – координаты центра платформы в абсолютной системе координат, $a_{V\omega}$, $a_{V\sigma}$, $a_{V\delta}$, $a_{\omega V}$, $a_{\omega\sigma}$, $a_{\omega\delta}$, $a_{\sigma V}$, $a_{\delta\omega}$, $a_{\sigma\sigma}$, $a_{\delta\delta}$, b_σ , b_δ – коэффициенты, связанные с параметрами колесного робота, ω – угловая скорость платформы,

$$i_\sigma = i_1 + i_2, \quad i_\delta = i_2 - i_1, U_\sigma = U_1 + U_2, \quad U_\delta = U_2 - U_1, \quad (31)$$

где i_1, i_2 – токи во внешних цепях электродвигателей, U_1, U_2 – сторонние ЭДС, приложенные к электродвигателям.

Выделим два канала управления:

– продольным перемещением робота

$$\dot{V} = -a_{V\omega} V\omega + a_{V\sigma} i_\sigma + a_{V\delta} i_\delta,$$

$$\frac{di_\sigma}{dt} = -a_{\sigma V} V - a_{\sigma\sigma} i_\sigma + b_\sigma U_\sigma;$$

– ориентацией робота

$$\dot{\alpha} = \omega,$$

$$\dot{\omega} = -a_{\omega V} V\omega + a_{\omega\sigma} i_\sigma + a_{\omega\delta} i_\delta,$$

$$\frac{di_{\delta}}{dt} = -a_{\delta\omega}\omega - a_{\delta\delta}i_{\delta} + b_{\delta}U_{\delta}.$$

Управление ориентацией робота

Задача управления заключается в том, чтобы найти управляющие напряжения U_1 , U_2 , компенсирующие ошибку угловой ориентации $\delta = \alpha - \alpha^*$ в соответствии с рис. 3.

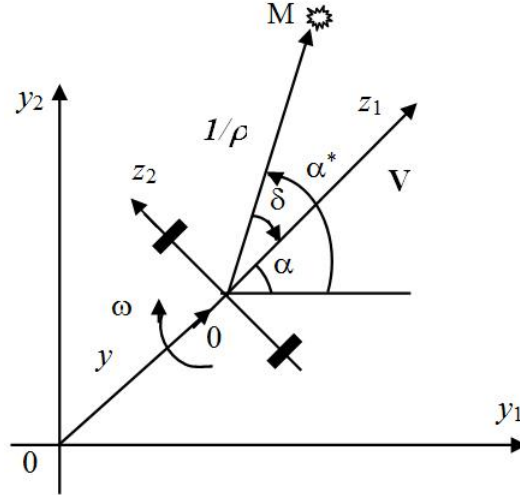


Рис. 3. Угловые координаты робота

- Движение на маяк

При малых отклонениях $\delta \approx 0$, $\dot{\delta} \approx 0$, $\ddot{\delta} \approx 0$ уравнение динамики будет иметь вид:

$$\ddot{\delta} + [a_{\omega V}V^* + a_{R/L}] \ddot{\delta} + [a_{\omega\delta}a_{\delta\omega} + a_{R/L}a_{\omega V}V^*] \dot{\delta} = -a_{\omega\sigma}a_{\sigma V}V + \bar{U}_{\delta}, \quad (32)$$

где \bar{U}_{δ} – управляющее воздействие, которое связано с переменными U_{σ} , U_{δ} соотношением:

$$b_{1/L}(a_{\omega\sigma}U_{\sigma} + a_{\omega\delta}U_{\delta}) = \bar{U}_{\delta}, \quad (33)$$

$$U_{\delta} = U_2 - U_1. \quad (34)$$

Выберем управляющее воздействие в виде:

$$\bar{U}_{\delta} = a_{\omega\sigma}a_{\sigma V}V - k_{\delta 0}\delta \quad (35)$$

и введем обозначения:

$$k_{\delta 2} = a_{\omega V}V^* + a_{R/L}, \quad k_{\delta 1} = a_{\omega\delta}a_{\delta\omega} + a_{R/L}a_{\omega V}V^*.$$

Тогда уравнение замкнутой системы примет вид:

$$\ddot{\delta} + k_{\delta 2}\ddot{\delta} + k_{\delta 1}\dot{\delta} + k_{\delta 0}\delta = 0. \quad (36)$$

При выборе коэффициента обратной связи $k_{\delta 0}$: $0 < k_{\delta 0} < k_{\delta 2}k_{\delta 1}$ ($k_{\delta 2} > 0, k_{\delta 1} > 0$), замкнутая система является асимптотически устойчивой [4].

- Движение вокруг маяка

При малых отклонениях $\delta \approx 0$, $\dot{\delta} \approx 0$, $\ddot{\delta} \approx 0$ уравнение динамики принимает вид:

$$\begin{aligned} \ddot{\delta} + [a_{\omega V}V^* + a_{R/L}] \ddot{\delta} + [a_{\omega\delta}a_{\delta\omega} + a_{R/L}a_{\omega V}V^*] \dot{\delta} = \\ = -[a_{\omega\delta}a_{\delta\omega} + a_{R/L}a_{\omega V}V^*] \rho^*V^* - a_{\omega\sigma}a_{\sigma V}V + \bar{U}_{\delta}, \end{aligned} \quad (37)$$

где ρ^* – эталонное значение радиуса кривизны вращения, \bar{U}_{δ} – управляющее воздействие, которое связано с переменными U_{σ} , U_{δ} соотношением (33).

Введем обозначения:

$$k_{\delta 2} = a_{\omega V} V^* + a_{R/L}, k_{\delta 1} = a_{\omega \delta} a_{\delta \omega} + a_{R/L} a_{\omega V} V^*$$

и выберем управляющее воздействие в виде:

$$\bar{U}_{\delta} = [a_{\omega \delta} a_{\delta \omega} + a_{R/L} a_{\omega V} V^*] \rho^* V^* + a_{\omega \sigma} a_{\sigma V} V - k_{\delta 0} \delta, \quad (38)$$

тогда уравнение замкнутой системы примет вид:

$$\ddot{\delta} + k_{\delta 2} \dot{\delta} + k_{\delta 1} \delta + k_{\delta 0} \delta = 0. \quad (39)$$

При $0 < k_{\delta 0} < k_{\delta 2} k_{\delta 1}$ ($k_{\delta 2} > 0, k_{\delta 1} > 0$) система (39) является асимптотически устойчивой [4].

Управление продольным перемещением робота

Задача управления заключается в том, чтобы найти напряжения U_1, U_2 , компенсирующие невязку по скорости $\sigma = V(t) - V^*(t)$. При малых отклонениях $\sigma \approx 0, \dot{\sigma} \approx 0$ уравнение динамики принимает вид:

$$\ddot{\sigma} + [a_{V\omega} \rho^* V^* + a_{R/L}] \dot{\sigma} + [a_{V\sigma} a_{\sigma V} + a_{R/L} a_{V\omega} \rho^* V^*] \sigma = -a_{V\omega} \ddot{V}^* - [a_{V\delta} a_{\delta \omega} + a_{R/L} a_{V\omega} V^*] \dot{\delta} - a_{V\sigma} a_{\sigma V} V^* - a_{V\delta} a_{\delta \omega} \rho^* V^* - a_{R/L} a_{V\omega} \rho^* (V^*)^2 + \bar{U}_{\delta}, \quad (40)$$

\bar{U}_{σ} – управляющее воздействие, которое связано с переменными U_{σ}, U_{δ} соотношением:

$$b_{1/L} (a_{V\sigma} U_{\sigma} + a_{V\delta} U_{\delta}) = \bar{U}_{\sigma}, \quad (41)$$

$$U_{\sigma} = U_2 + U_1. \quad (42)$$

Введем обозначения:

$$k_{\sigma 1} = a_{V\omega} \rho^* V^* + a_{R/L}, k_{\sigma 0} = a_{V\sigma} a_{\sigma V} + a_{R/L} a_{V\omega} \rho^* V^*.$$

Выбор управляющего воздействия в виде:

$$\bar{U}_{\delta} = a_{V\sigma} a_{\sigma V} V^* + a_{V\delta} a_{\delta \omega} \rho^* V^* + a_{R/L} a_{V\omega} \rho^* (V^*)^2 + [a_{V\delta} a_{\delta \omega} + a_{R/L} a_{V\omega} V^*] \dot{\delta} \quad (43)$$

обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы:

$$\ddot{\sigma} + k_{\sigma 1} \dot{\sigma} + k_{\sigma 0} \sigma = -a_{V\omega} \ddot{V}^*. \quad (44)$$

Поскольку все приведенные законы управления, определяемые соотношениями (33)–(35), (38), (41)–(43), выведены по первому приближению, они обеспечивают асимптотическую устойчивость в малом нелинейной системы (25) [4]. Вблизи маяка робот теряет управление, это связано также и с особенностью системы технического зрения, однако в этом случае вследствие достаточно большой скорости робот продолжает двигаться по инерции, что позволяет ему погасить маяк. Предложенные законы управления не требуют описания траектории движения и не используют поперечные отклонения от траектории. Другим достоинством является то, что все используемые в алгоритме управления параметры доступны измерению, то есть система физически реализуема.

Синтез алгоритмов ориентации

Рассмотрим задачу высшего уровня системы управления мобильного колесного робота – задачу его ориентации в рабочем пространстве. В работе алгоритмы ориентации реализованы с помощью аппарата конечных автоматов.

Конечный автомат рассматривается как система $S = \{U, X, Y, f, g\}$, где $U = \{u_1, \dots, u_m\}$ – алфавит входа, $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – алфавит состояний, $Y = \{y_1, \dots, y_r\}$ – алфавит выхода, $f : X \times U \rightarrow X$ – правило перехода, $g : X \rightarrow Y$ – правило выхода (логика Мура) [5]. При

использовании конечно-автоматного подхода мобильный робот рассматривается как «реактивная» система. Такие системы реагируют на поток событий изменением состояний и выполнением действий при переходах из состояния в состояние или действий в состояниях. Рассмотрим решение задач, в которых робот находится в сложном динамическом окружении.

- Задача «Лес»

На полигоне определяется прямоугольная область – «лес», внутри которой произвольным образом расставлены неподвижные препятствия. Робот начинает упражнение в середине одной из сторон прямоугольника, ограничивающего «лес». В точках, определяющих границы противоположной стороны «леса», находятся маяки, которые горят на протяжении всего упражнения. Робот должен проехать через «лес», не столкнувшись ни с одним «деревом», и достичь его противоположного края (пересечь линию, соединяющую угловые маяки). Упражнение считается выполненным в момент касания роботом произвольной своей частью границы «леса», противоположной стартовой. При движении через «лес» робот может использовать как сигналы маяков, так и другие способы ориентации.

Представим решение задачи «Лес» в виде конечного автомата. В качестве входного множества примем информацию о наличии «ворот» и о препятствиях, поступающую из системы технического зрения, и об их расположении относительно робота: $U = \{u_1 - \text{есть «ворота», препятствий нет; } u_2 - \text{есть «ворота», есть препятствие; } u_3 - \text{нет маяков, образующих «ворота}\}$. Элементы выходного множества представляют собой фазы движения $Y = \{y_1 - \text{движение между воротами; } y_2 - \text{обход препятствия; } y_3 - \text{остановка}\}$. Алфавит состояний представляет собой следующее множество: $X = \{x_1 - \text{движение по прямой в «ворота»; } x_2 - \text{обход препятствия по окружности; } x_3 - \text{остановка}\}$. Функционирование алгоритма начинается с состояния x_1 , то есть автомат является инициальным. Граф переходов, соответствующий описанному конечному автомату, представлен на рис. 4.

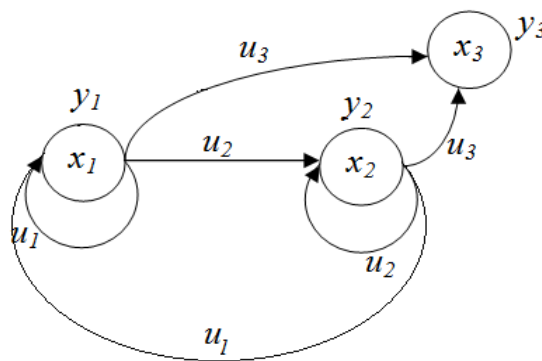


Рис. 4. Конечный автомат, реализующий задачу «Лес»

- Задача «Лес со светлячками»

В этом упражнении, как и в предыдущей задаче, на полигоне произвольным образом расположены неподвижные препятствия. Помимо этого на полигоне горят несколько маяков – «светлячков». Робот должен подъехать к каждому маяку и «погасить» его «фонариком», избегая столкновений с препятствиями. Порядок гашения маяков произвольный. Упражнение заканчивается при гашении последнего маяка.

Представим решение задачи «Лес со светлячками» в виде конечного автомата. В качестве входного множества примем информацию о количестве активных маяков и о наличии препятствия, поступающую из системы технического зрения: $U = \{u_1 - \text{хотя бы один активный маяк и нет препятствий; } u_2 - \text{хотя бы один активный маяк и есть препятствие; } u_3 - \text{нет активных маяков}\}$. Элементы выходного множества представляют собой фазы движения $Y =$

$\{y_1$ – движение прямо на маяк; y_2 – обход препятствия; y_3 – остановка $\}$. Алфавит состояний для задачи «Лес со светлячками» представляет собой двухэлементное множество: $X = \{x_1$ – движение по прямой на маяк; x_2 – обход препятствия по окружности; x_3 – остановка $\}$. Автомат является инициальным, начальное состояние – x_1 . Граф переходов, соответствующий описанному конечному автомату, представлен на рис. 5.

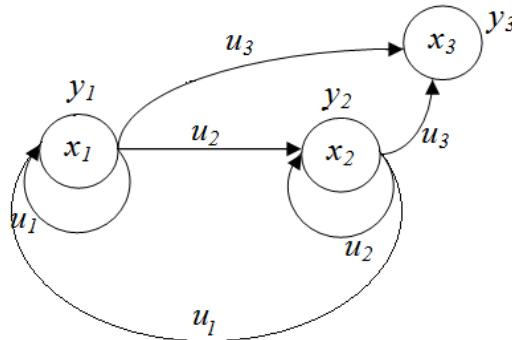


Рис. 5. Конечный автомат, реализующий задачу «Лес со светлячками»

- Задача «Полоса с препятствиями»

В этом упражнении робот начинает движение, находясь на полосе. Он должен двигаться по ней, объезжая препятствия, которые могут встретиться на пути. При обнаружении препятствия робот должен его объехать, после чего вернуться на полосу и продолжить движение в том же направлении. Упражнение заканчивается при пересечении роботом финишной отметки.

Представим решение задачи «Полоса с препятствиями» в виде конечного автомата. В качестве входного множества примем информацию о наличии полосы и препятствия, поступающую из системы технического зрения: $U = \{u_1$ – есть полоса, нет препятствий; u_2 – есть полоса и есть препятствие; u_3 – нет полосы, есть препятствие; u_4 – нет полосы, нет препятствия $\}$. Элементы выходного множества представляют собой фазы движения $Y = \{y_1$ – движение по полосе; y_2 – обход препятствия; y_3 – поиск полосы $\}$. Алфавит состояний для этой задачи представляет собой двухэлементное множество: $X = \{x_1$ – движение по полосе; x_2 – обход препятствия; x_3 – поиск полосы $\}$. Автомат является инициальным, начальное состояние – x_1 . Граф переходов, соответствующий описанному конечному автомату, представлен на рис. 6.

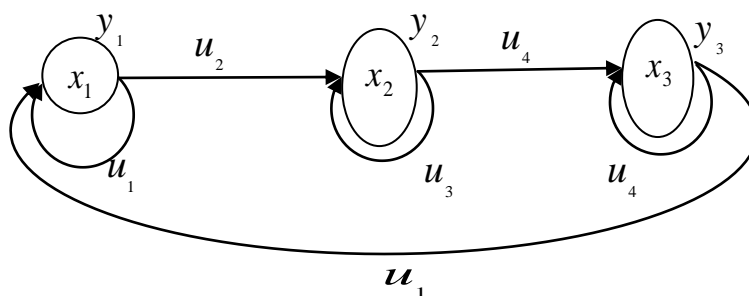


Рис. 6. Конечный автомат, реализующий задачу «Полоса с препятствиями»

Математическое моделирование

Для отработки алгоритмов ориентации мобильного колесного робота и алгоритмов управления его движением при выполнении различных упражнений из регламента соревнований «Мобильные роботы» была написана программа-эмулятор «Полигон» с использованием программного пакета MATLAB 7. Она состоит из модуля моделирования

работы среды, в которой будет функционировать мобильный колесный робот, в частности моделирования работы маяков; модулей сенсорной системы робота; анализатора обстановки (модуль определяет поставленную перед роботом задачу); расчета траектории движения в соответствии с поставленной задачей и модуля расчета локальных регуляторов для движения по этой траектории. Программа написана таким образом, что позволяет подключать дополнительные модули для отработки новых алгоритмов управления мобильным роботом.

На рис. 7 и 9 представлены траектории движения робота при наведении на маяк и при движении вокруг него. На рис. 8 и 10 изображены соответствующие временные диаграммы, на которых видно, что со временем происходит сведение ошибок угловой ориентации и по скорости к нулю. На рис. 10 также показано, что нормальная ошибка $e(t)$ со временем стремится к нулю.

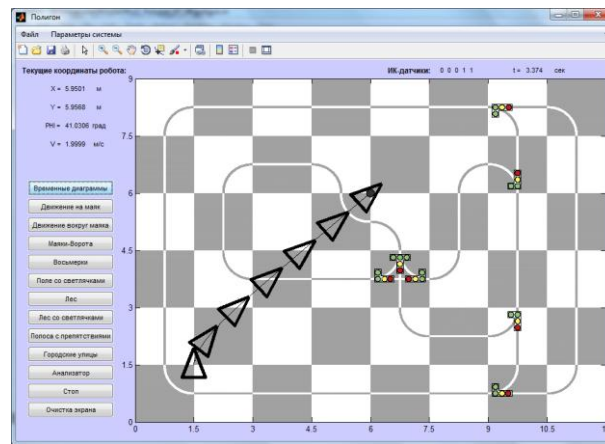


Рис. 7. Наведение робота на маяк

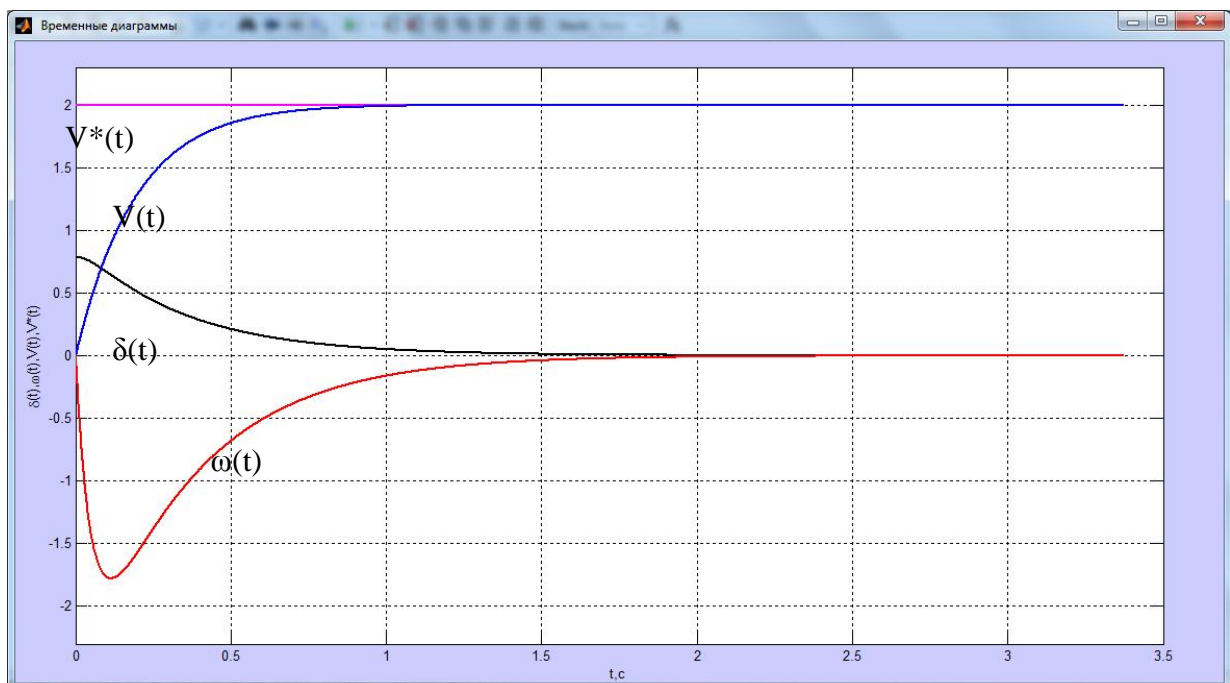


Рис. 8. Временная диаграмма

На рис. 11, 12 и 13 изображены траектории движения робота при выполнении упражнений «куча», «маяки-ворота» и «маяки-ворота-восьмерки».

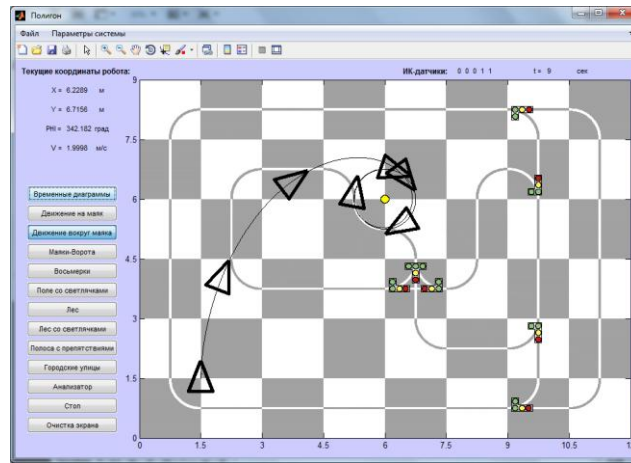


Рис. 9. Движение робота вокруг маяка

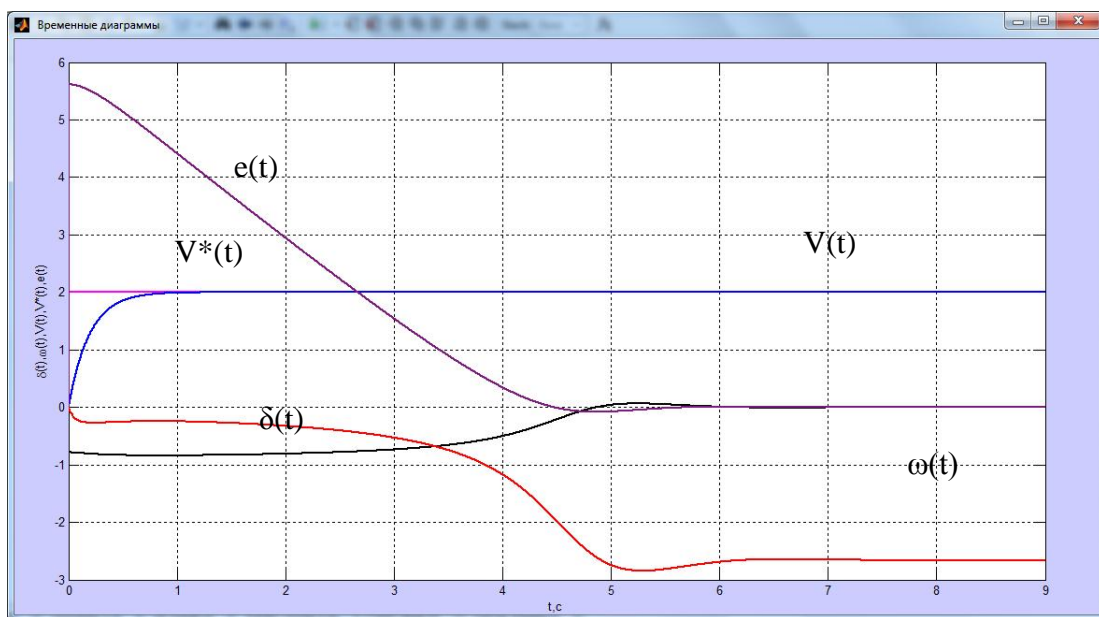


Рис. 10. Временная диаграмма

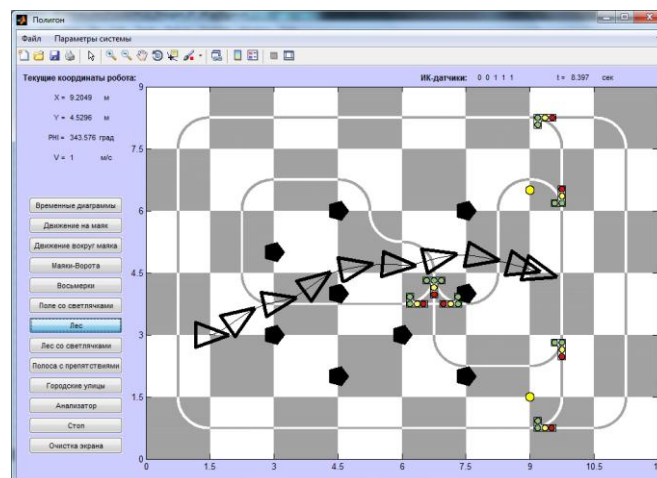


Рис. 11. Упражнение «Лес»

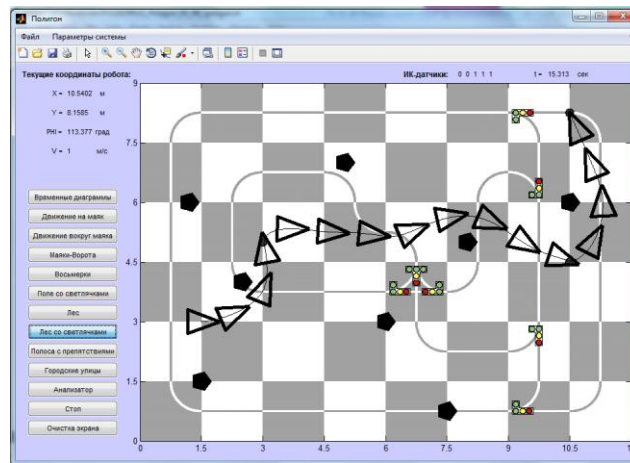


Рис. 12. Упражнение «Лес со светлячками»

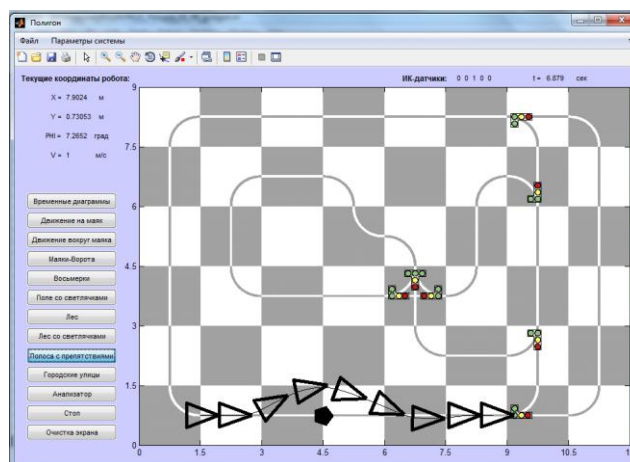


Рис. 13. Упражнение «Полоса с препятствиями»

Использованные методы

Колесный робот является нелинейной многоканальной и многосвязной системой, активно взаимодействующей с внешней средой. Для организации маневренного движения робота и полного использования возможностей его механизма требуется привлечение современных методов нелинейной теории управления, системного анализа и математического моделирования.

Достигнутые результаты

- Получена и проанализирована математическая модель мобильного колесного робота в задачно-ориентированных координатах.
- Разработаны алгоритмы управления движением мобильного колесного робота, находящегося в сложном динамическом окружении.
- Проанализирована математическая модель замкнутой системы управления движением мобильного колесного робота, находящегося в сложном динамическом окружении.
- Разработана методика построения алгоритмов управления механическими системами с неголономными ограничениями в сложном динамическом окружении.

- Разработан пакет прикладных программ для моделирования управляемого движения мобильного робота, позволяющий наглядно исследовать процессы, происходящие в системе управления.

Область применения

Теоретическая значимость данного проекта – развитие нелинейных наблюдателей, а практическая – развитие алгоритмов управления транспортными средствами, движущимися в сложном динамическом окружении.

Публикации

1. Петрик А.И. Алгоритм контурного управления движением колесного робота в условиях неполного вектора измерений // Сб. тезисов докладов VIII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. СПб., 2011. Вып. 1. С. 205–207.
2. Петрик А.И., Болтунов Г.И. Программа для моделирования упражнений из регламента соревнований «Мобильные роботы» // Материалы Международной научно-практической конференции «Математические методы и модели анализа и прогнозирования развития социально-экономических процессов черноморского побережья Болгарии». Поморье, 2012. С. 118–122.
3. Петрик А.И., Болтунов Г.И. Решение некоторых транспортных задач с использованием конечных автоматов // Материалы Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (май 2012 г.). Красноярск, 2012. С. 113–122.

Литература

1. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб., 2001. – 227 с.
2. Мартыненко Ю.Г. Управление движением мобильных колесных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11. Вып. 8. С. 29–80.
3. Мартыненко Ю.Г. Динамика мобильных роботов // Соросовский образовательный журнал. 2000. № 5. С. 110–116.
4. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости: Учебное пособие. СПб., 2008. – 480 с.
5. Мельников А.А., Ушаков А.В. Двоичные динамические системы дискретной автоматики. СПб., 2005. – 220 с.



Пирожникова Ольга Игоревна
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: cheezcake@mail.ru

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

О.И. Пирожникова

Научный руководитель – профессор В.Л. Ткалич

Цели и задачи

Решение задач статического и динамического анализов упругих чувствительных элементов (УЧЭ) систем управления, а также построение математических моделей контроля их качества включают разработку:

- новой методологии проектирования элементной базы датчиков, микросенсоров и коммутационных устройств на основе УЧЭ, позволяющей рассчитывать сложнопрофильные объекты, содержащие области с физической и геометрической нелинейностью;
- новых видов коммутационных устройств (магнитоуправляемых контактов), отличающихся от аналогичных тем, что с целью повышения качества контактирования и получения новых функциональных возможностей, они содержат УЧЭ с новой микро- и макрогеометрией рабочих поверхностей;
- неразрушающих бесконтактных методов исследования стереометрии и внутренних структурных дефектов УЧЭ с целью обеспечения надежного прогнозирования их качества;
- новой методики оценки технического уровня и качества сильфонных устройств.

Методы исследования

В проекте рассмотрены проблемы исследования и перспектив развития УЧЭ, осуществлена их классификация, определены основные рабочие характеристики и требования к материалам. В результате анализа отечественных и зарубежных работ по данной теме [1] выявлены актуальные проблемы статики и динамики (аэро-, гидродинамики, механодинамики, термодинамики и термоупругости) УЧЭ.

Классификация УЧЭ осуществлена по назначению, типу, конструкции, материалам и технологии изготовления. Анализ требований, предъявляемых к материалам современных УЧЭ, проведен с учетом большого разнообразия областей их применения, характера нагружения, условий эксплуатации и выполняемых функций [1, 2].

Проанализированы специфические требования к материалам упругих элементов, такие как высокое сопротивление к микропластическим деформациям, термостойкость, устойчивость к коррозии и фреттинг-коррозии, высокая / низкая электропроводность, способность к намагничиванию, плотность дислокаций, хорошая паяемость и низкий уровень термомеханических напряжений в спае со стеклом.

На основании анализа эффектов давления и технологий, позволяющих их использовать, обосновывается актуальность исследования УЧЭ с точки зрения долговечности их применения в различных датчиках, в частности в манометрических приборах. Аргументирована перспективность исследования УЧЭ, используемых в коммутационных устройствах систем

управления. Анализ тенденций развития датчиков и коммутационных устройств позволяет утверждать, что в ближайшее десятилетие можно ожидать некоторый спад производства контактных реле (исключая стабильную область герметизированных магнитоуправляемых контактов как элементов, стойких к радиационному излучению, кратковременным перегрузкам по току и напряжению, способных сохранять работоспособность в случае аварийного отключения источника питания) и дальнейший рост бесконтактных реле. Рис. 1 иллюстрирует факт того, что процент выпуска потенциометрических и индуктивных датчиков будет уменьшаться, а тензорезистивных, пьезорезистивных, емкостных механотронных – увеличиваться.

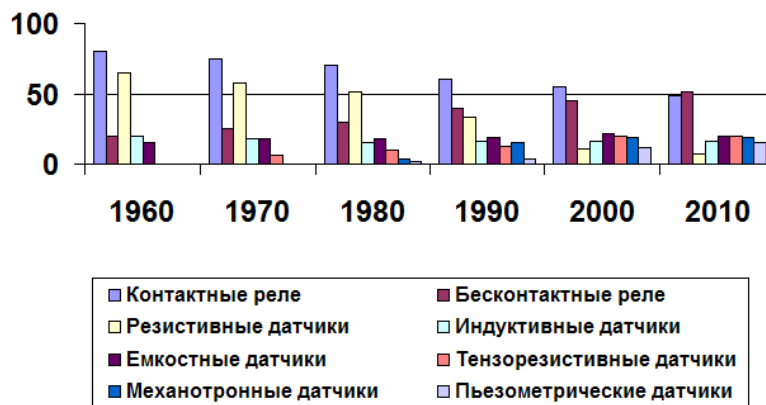


Рис. 1. Тенденции развития датчиков и коммутационных реле

На рис. 2 представлены тенденции развития УЧЭ, полученные в результате анализа отечественной и зарубежной научно-технической и патентной литературы [1, 2].

Выявлено, что с точки зрения качества УЧЭ его параметрическая надежность в первую очередь зависит от неупругих эффектов материала, которые проявляются в виде гистерезиса, релаксации и ползучести. Погрешности именно от этих эффектов являются причиной нестабильности показаний датчиков во времени и часто ограничивают приборную точность. Следовательно, перспективным направлением является разработка методов, позволяющих понизить степень влияния этих факторов.



Рис. 2. Тенденции развития УЧЭ

При анализе требований, предъявляемых к полимерным УЧЭ, возникает проблема исследования дефектности их внутренней структуры. До сегодняшнего дня она не имеет удовлетворительного решения. В данном проекте предложено и исследовано два неразрушающих метода исследования.

Анализ эксплуатационных свойств УЧЭ с регулярным микрорельефом (РМР) рабочих поверхностей выявил совокупное улучшение показателей их качества (Табл. 1).

Таблица 1

Анализ эксплуатационных свойств УЧЭ с регулярным микрорельефом (РМР) рабочих поверхностей

Свойства	Параметры регулярного микрорельефа				Примечания
	RR/h	NN/S _k	γγ,β/α	ТТ _p /F _n	
Повышение качества УЧЭ	++	++	++	++	
Повышение ресурса работы (износостойкости)	++	++			Повышение износостойкости электроконтактов и ламелей в два раза
Повышение сопротивления усталости	++	++			Повышение сопротивления усталости в 1,2–2,5 раза
Улучшение прирабатываемости контактов		++		++	
Стабилизация толщины слоя смазки (ртутносмачиваемой контактный сердечник (КС))		++	++		
Повышение гидроплотности		++			Повышение гидроплотности резиномеханических уплотнителей сильфонных клапанов в 2–2,5 раза
Улучшение качества спая УЧЭ со стеклом	++		++		Отсутствие растрескивания стекла в зоне спая баллона КС
Увеличение коррозионной стойкости	++				В том числе повышение сопротивления фреттинг-коррозии
Повышение темпа очистки поверхности УЧЭ при вакуумировании	++			++	Темп очистки увеличивается в 4-5 раз
Уменьшение механического гистерезиса		++			Актуально для мембранных устройств
Уменьшение толщины покрытия	++	++			Актуально для ламелей, покрытых серебром, в 1,8-2 раза при том же числе коммутаций

Устранение эффекта залипания КС за счет микро-сварки	++				Повышение токов коммутации магнитоуправляемого контакта
Увеличение активности поверхности (адгезионные свойства)				++	
Уменьшение веса УЧЭ за счет снижения толщины стенки при сохранении требуемой жесткости				++	Актуально для сильфонов и витых пружин
Уменьшение и стабилизация электрического сопротивления контактного перехода	++		++		<i>В герконах в 1,5-2 раза</i>
Увеличение плавности хода		++	++		Актуально для скользящих контактов
Увеличение теплопроводности				++	Увеличение рассеиваемой мощности в герконах

Проведена разработка двух неразрушающих бесконтактных методов исследования и контроля УЧЭ в напряженно-деформированном состоянии на базе томографического и автоколлимационного методов. Томографический метод, базирующийся на принципах магнитного внутривидения и использующий современное компьютерное томографическое оборудование, позволяет исследовать как стереометрические параметры сложнопрофильных УЧЭ (толщину внутренних перегородок, размеры и точное местоположение макротрещин, каверн, макропор), так и осуществлять их дефектоскопию с установлением неоднородных областей в структуре. На рентгеновском компьютерном томографе был проведен анализ металлических УЧЭ и сильфонов, а на ядерном магниторезонансном томографе (ЯМР-томографе) – полимерных сильфонных УЧЭ со спиралевидными гофрами.

В ходе исследования были использованы рентгеновские аппараты фирмы «General Electric», модель «СТ Раса» и ЯМР-томографы фирмы «Siemens», модель «Magnetom Open».

Автоколлимационный оптический бесконтактный метод исследования УЧЭ, использующий современный автоколлимационный микроскоп, сканирующее устройство и средства вычислительной техники, предусматривает формирование на рабочей поверхности оболочечного УЧЭ отражающего покрытия. Он служит для выявления взаимосвязи ряда геометрических параметров профиля УЧЭ с такими важными характеристиками качества, как циклопрочность, трещиностойкость и др.

Оба метода позволяют исследовать геометрические параметры УЧЭ как непосредственно в состоянии статического нагружения этих элементов, так и после воздействия на них различных видов динамических нагрузок. Для каждого метода разработаны специальные приспособления, создающие сжимающие, растягивающие, изгибные и крутящие статические нагрузки на исследуемые УЧЭ.

Достигнутые результаты

1. При анализе «мелкослойных» структур УЧЭ, то есть структур с очень малой толщиной несущего слоя, оправдан переход к расчетной модели пакета в виде однослойной

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

структуры с эквивалентными характеристиками упругости. При расчете тонкостенных пространственных структур УЧЭ произвольной геометрии (с переменной толщиной стенки, произвольным профилем гофра и т. д.) подход к формированию расчетной модели имеет аналогичный характер. В качестве базовых элементов принимаются трех- или четырехугольные конечные элементы тонких оболочек Кирхгофа-Лява и Тимошенко. Функции формы строятся таким образом, чтобы на общей границе отсутствовали разрывы полей перемещения и их производных.

При анализе структур УЧЭ с переменной толщиной стенок, наиболее оправдано использование разработанной в [13] модели элаستيку:

$$\begin{aligned} \varepsilon^2(1-\varepsilon^2)^2 \frac{d^2 \text{cnu}}{d\varepsilon^2} &= 2\varepsilon^4 \text{cn}^5 u + \varepsilon^2[\varepsilon^2 - 2Z^2(u)]\text{cn}^3 u + \\ &+ [2\varepsilon^2 Z^2(u) - \varepsilon^4 - Z^2(u)]\text{cnu} + [Z(u) - Z(u)\varepsilon^2 - 4Z(u)\varepsilon^2 \text{cn}^2 u]\text{snu} \text{dnu} - \\ &- \varepsilon^4 [2\varepsilon^2 \text{cn}^3 u - 2\varepsilon^2 + 1]u^2 + 2\varepsilon^2 [2\varepsilon^2 Z(u)\text{cn}^3 u - Z(u)(2\varepsilon^2 - 1)\text{cnu} + \\ &+ \varepsilon^2(3\text{cn}^2 u - 1)\text{snu} \text{dnu} - \varepsilon^4 \text{snu} \text{dn}^2 u]u + \varepsilon^2 Z(u)\text{snu} \text{dn}^2 u - \varepsilon^2 \text{snu} \text{dnu} \frac{d \text{dnu}}{du}; \\ 2\varepsilon^2(1-\varepsilon^2)^2 \frac{d^2 u}{d\varepsilon^2} &= (6-4\varepsilon^2)\text{snu} \text{cnu} \text{dn}^2 u + 4\varepsilon^4 \text{snu} \text{cnu} + (5\varepsilon^2 - 6)Z(u)\text{dnu} - \\ &- 8Z(u)\text{dn}^3 u - \varepsilon^2 [2 + 2Z^2(u) + \text{dnu}]\text{snu} \text{cnu} - 2\varepsilon^2 Z(u)\text{dn}^2 u, \end{aligned}$$

где ε – эксцентриситет, $Z(u)$ – Эрмитова модификация функции Якоби второго рода.

Для тонких оболочек Кирхгофа-Лява ($h/R \leq 1$) получены приближенные выражения для компонент деформации с учетом коэффициентов Лямэ [1]. Выведены матричные соотношения термоупругости для общего случая напряженного состояния оболочечных УЧЭ из анизотропного и ортотропного материалов, включающие матрицы жесткости, выраженные через компоненты матрицы податливости. Осуществлено упрощение формул для температурных усилий и моментов этих оболочек.

Новый подход к исследованию тонкостенных конструкций УЧЭ, основанный на применении теории Абелевых функций, позволяет достичь наиболее корректного и адекватного аналитического описания, как самих УЧЭ, так и происходящих в них динамических процессов. При этом аналитические выражения, описывающие рабочие поверхности УЧЭ, решения нелинейных уравнений движения, а также решение вариационной задачи порядка p , используемые для оценки устойчивости и надежности УЧЭ, строятся из Абелевых функций от p -переменных.

Сущность подхода заключается в том, что УЧЭ рассматриваются как геометрические образы, имеющие конечные размеры-объемы, ограниченные алгебраическими поверхностями соответствующих порядков. Это позволяет описать одновременно процесс колебания при внешних воздействиях и поведение самого слоя материала, то есть смоделировать процесс развития колебаний в УЧЭ алгебраически взаимосвязанными уравнениями.

Предложенный метод позволяет положить в основание разработанного подхода теорию упругости, опирающуюся, в отличие от всех ныне существующих, на представление элементов тензора деформации квадратичными формами, а не первыми членами бесконечных рядов по степеням смещений (как это принято в современной теории упругости). При такой связи смещений и деформаций задача об устойчивости упругих элементов по отношению к конечным внешним воздействиям осуществляется посредством постановки вариационной задачи порядка p , решение которой позволяет изучать поведение динамической системы как функции, непрерывно зависящей от времени, начальных и граничных условий.

2. Разработаны алгоритмы и пакет прикладных программ для получения численных решений выведенных волновых уравнений.

3. Проведен анализ факторов, влияющих на статическую устойчивость тонкостенных конструкций. Предложена стратегия численного решения задач статической устойчивости сложнопрофильных многосвязных УЧЭ.

4. Рассмотрены проблемы потери устойчивости УЧЭ при появлении несмежных форм равновесия и следящих нагрузках.

5. Разработан новый метод статического анализа процессов деформирования сложнопрофильных тонкостенных УЧЭ. Указано на целесообразность совместного использования при рассмотрении нелинейных процессов УЧЭ двух систем координат: лагранжевой и эйлеровой, что облегчает учет изменения метрик деформированной структуры и упрощает ряд граничных условий.

В основу нового комбинированного многоуровневого метода (КММ) статического анализа УЧЭ положена идея представления полной структуры УЧЭ набором типовых подструктур, которые включают набор КЭ, и выполнение процедуры разбиения вектора перемещений на внутренние и граничные вектора. Это позволяет независимо рассматривать два состояния: связанное с внутренними свойствами изолированной подструктуры и учитывающее взаимодействие подструктуры со смежными компонентами структур:

$$\begin{aligned} [\bar{K}] &= [K_{\Gamma,\Gamma}] - [K_{\Gamma,B}] [K_{B,B}]^{-1} [K_{B,\Gamma}], \\ \{\bar{Q}\} &= \{Q_{\Gamma}\} - [K_{\Gamma,B}] [K_{B,B}]^{-1} \{Q_B\}. \end{aligned} \quad (1)$$

где $[\bar{K}]$ – матрица жесткости подструктуры, $\{\bar{Q}\}$ – вектор краевых усилий.

Созданная по этой методике библиотека суперэлементов полностью определяет свойства подструктуры через параметры граничных узловых точек. Для построения матрицы жесткости и вектора нагрузок также предложены алгоритмы формирования суперэлемента и решения краевых задач.

6. Разработана общая методология проведения экспериментов по исследованию статики УЧЭ, выбран математический аппарат статистической обработки полученных данных. Экспериментальные исследования статики УЧЭ подтвердили корректность расчетных данных и аналитических зависимостей, полученных в работе. Они также позволили установить вид зависимостей технических характеристик (чувствительности, нелинейности, эффективной площади, прочности и отдельных параметров надежности) от конкретных геометрических параметров рабочего профиля (радиуса гофров, толщины оболочки и т. д.) УЧЭ, условий его нагружения и закрепления по контуру.

Обработка результатов исследования серийных образцов УЧЭ осуществлялась методами регрессионного, корреляционного и дисперсионного анализов.

7. Решена задача построения математических моделей (ММ) для анализа основных геометрических параметров сильфонов при различных уровнях и условиях нагружения.

Результаты экспериментальных исследований зависимости циклопрочности от геометрических параметров аппроксимированы полиномом второго порядка:

$$y = \sum_{i=0}^{27} b_i x_i, \quad (2)$$

где $x_0=1$, $x_1= D_{cp}$, $x_2= r_{вн}$, $x_3= r_{нр}$, $x_4=t$, $x_5= h$, $x_6= n$, $x_7= x_1 \bullet x_1$, $x_8= x_2 \bullet x_2$, $x_9= x_3 \bullet x_3$, $x_{10}= x_4 \bullet x_4$, $x_{11}= x_5 \bullet x_5$, $x_{12}= x_6 \bullet x_6$, $x_{13}= x_1 \bullet x_2$, $x_{14}= x_1 \bullet x_3$, $x_{15}= x_1 \bullet x_4$, $x_{16}= x_1 \bullet x_5$, $x_{17}= x_1 \bullet x_6$, $x_{18}= x_2 \bullet x_3$, $x_{19}= x_2 \bullet x_4$, $x_{20}= x_2 \bullet x_5$, $x_{21}= x_2 \bullet x_6$, $x_{22}= x_3 \bullet x_4$, $x_{23}= x_3 \bullet x_5$, $x_{24}= x_3 \bullet x_6$, $x_{25}= x_4 \bullet x_5$, $x_{26}= x_4 \bullet x_6$, $x_{27}= x_5 \bullet x_6$.

8. Разработаны методы и алгоритмы нахождения собственных значений для анализа динамики и устойчивости УЧЭ.

Исследование частот и форм свободных колебаний УЧЭ в общем случае сводится к решению алгебраической проблемы собственных значений вида:

$$[K_1]\{U\}-\omega^2[M]\{U\}=0, \quad (3)$$

где $[K_1]$ – матрица изгибной жесткости, $\{U\}$ – вектор-столбец перемещений, $[M]$ – матрица масс.

Решением является определение частот ω_i^2 и форм $\{X\}_i$ свободных колебаний.

Определение бифуркационных критических нагрузок в задачах устойчивости также требует нахождения собственных значений (критического параметра нагрузки) и собственных векторов (форм потери устойчивости) и решения уравнений вида:

$$[K_1]\{U\}-\lambda[K_2]\{U\}=0, \quad (4)$$

где $[K_2]$ – матрица геометрической жесткости; λ – критический коэффициент.

Выражения (3) и (4) позволяют решить частичную проблему собственных значений. Для решения полной проблемы собственных значений необходимо использовать уравнение вида:

$$[K_1]\{U\}=\lambda\{U\}. \quad (5)$$

Таким образом, при решении проблемы собственных значений следует выделять полную, когда необходимо определить все собственные значения, и частичную, когда предметом определения являются сравнительно немногие собственные значения и соответствующие им собственные вектора, проблемы.

Соответственно различию формулировок проблемы собственных значений осуществляется выбор рациональных методов анализа. При выборе того или иного метода решения проблемы, следует ориентироваться на такие критерии, как надежность, простота вычислительной схемы, минимальность числа вычислительных операций, приспособленность метода к решению серии однотипных задач.

9. Разработаны различные варианты ММ колебательных систем УЧЭ для исследования их частотных спектров. Предложена методика расчета амплитудно-частотных характеристик многосвязных УЧЭ при кривошипном и центробежном возбуждении их колебательных контуров с использованием метода электромеханических аналогий. Разработаны матрично-топологические модели для частотного анализа сложнопрофильных и многосвязных УЧЭ на основе перехода к системе со сосредоточенными параметрами, с использованием методов: электромеханических аналогий, Релея-Ритца и теории графов.

Уравнение системы УЧЭ со сосредоточенными параметрами в общем виде представляется матричным уравнением:

$$[C]\{Q\}=\{W\}, \quad (6)$$

где $\{W\}$ – вектор-столбец узловых усилий; $\{Q\}$ – искомый вектор-столбец смещений; $[C]$ – матрица динамической комплексной жесткости.

Решение матричного уравнения имеет вид:

$$\{Q\}=[C^{-1}]\{W\}. \quad (7)$$

Формализация записи уравнения (4) для решения его на ЭВМ достигается при использовании узловой топологической матрицы $[A]$. Уравнение (3) в матрично-топологической и символической форме принимает вид:

$$[A][C_1][A^T]\{X\}=[A]\{F\}, \quad (8)$$

где $[C_1]$ – диагональная матрица комплексной жесткости; $\{F\}$ – вектор-столбец комплексных сил; $\{X\}$ – вектор-столбец комплексных смещений.

Вычисления по уравнению (8) осуществляются введением в ЭВМ исходных данных ($[A]$, $[C_1]$, $\{F\}$), которые находятся по топологической модели УЧЭ. Решением является вектор-столбец смещений $\{X\}$, позволяющий определить собственные частоты колебаний данного устройства.

Предлагаемая матрично-топологическая модель обладает большей жесткостью, чем реальная конструкция УЧЭ, поэтому частота колебаний по сравнению с истинной выше.

Области возможного использования результатов проекта

Методика рассчитана на широкий круг специалистов и позволяет осуществлять оптимизацию проектирования и производства УЧЭ.

Разработаны конструкции магнитоуправляемых герметизированных контактов с повышенным уровнем надежности.

На основании метода вибронакатки разработан новый высокоэкономичный техпроцесс обработки УЧЭ, позволяющий улучшить эксплуатационные свойства их рабочих поверхностей.

Создано специальное устройство для формирования РМР на листовых тонкостенных образцах, а также приспособление для прокатки проволочных образцов при создании упругих коммутационных элементов. Научные аспекты работы нашли свою реализацию в лекционных курсах для студентов, читаемых преподавателями кафедр «Проектирование компьютерных систем» и «Измерительные технологии и компьютерная томография» НИУ ИТМО.

Публикации

1. Буданова А.Ю., Крылов В.А., Пирожникова О.И. Анализ современной патентной литературы по сильфонным элементам датчиков систем управления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 40. СПб., 2007. С. 80–85.
2. Ткалич В.Л., Кокшаров Д.Н., Буданова А.Ю., Пирожникова О.И. Оценка влияния присоединенных масс на динамику упругих чувствительных элементов ртутных герконов // Известия вузов. Приборостроение. 2008.
3. Ткалич В.Л., Кокшаров Д.Н., Буданова А.Ю., Пирожникова О.И. Анализ амплитудно-частотных характеристик упругих чувствительных элементов газонаполненных герконов и балочных акселерометров // Известия вузов. Приборостроение. 2008.
4. Нечаев В.А., Нечаева Н.В., Пирожникова О.И. Бесконтактный метод контроля механических параметров ферромагнитных материалов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008.
5. Нечаев В.А., Нечаева Н.В., Пирожникова О.И. Магнитный метод неразрушающего контроля механических характеристик широкополостных сталей // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008.
6. Нечаев В.А., Нечаева Н.В., Пирожникова О.И. Исследование влияния динамических нагрузок на величину деформации верхнего слоя ферромагнетиков // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008.
7. Лабковская Р.Я., Нечаева Н.В., Нечаев В.А., Пирожникова О.И. Анализ жесткости УЧЭ датчиков и герконовых реле систем управления и автоматизации // Материалы VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. СПб., 2010.

8. Лабковская Р.Я., Нечаева Н.В., Нечаев В.А., Пирожникова О.И. Анализ жесткости УЧЭ датчиков и микроакселерометров систем управления // *Материалы VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых*. СПб., 2010.
9. Ткалич В.Л., Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И. Метод повышения надежности упругих чувствительных элементов систем управления и автоматики // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2011. № 1 (71). С. 136–138. Лабковская Р.Я., Нечаев В.А., Нечаева Н.В., Пирожникова О.И. Математические модели чувствительных элементов линейного акселерометра в динамическом режиме // *Сб. тезисов докладов VIII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых*. Вып. 1. Труды молодых ученых. СПб., 2011. С. 138–139.
10. Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И. Сильфонные упругие элементы систем управления // *Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых*. Вып. 1. Информационная безопасность, проектирование, технология элементов и узлов компьютерных систем. СПб., 2012. С. 163–165.
11. Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л. Анализ присоединенных масс упругих чувствительных элементов ртутных герконов // *Известия вузов. Приборостроение*. 2012. № 7.
12. Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л. Разработка библиотеки конечных элементов для САПР упругих компонентов герконов // *Известия вузов. Приборостроение*. 2012. № 10.

Литература

1. Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе // *Монография*, 2011. – 408 с.
2. Харазов К.И. Устройства автоматики с магнитоуправляемыми контактами. М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 370 с.



Семьина Светлана Алексеевна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптики квантоворазмерных систем
E-mail: semina.svetlana@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЗРАЧНОГО ОПТИЧЕСКОГО НАНОКОМПОЗИЦИОННОГО КЛЕЯ

С.А. Семьина

Научный руководитель – профессор И.Ю. Денисюк

Введение

Нанокomпозиты – материалы, состоящие из полимерной и нанодисперсной неорганической фаз, являются интенсивно развиваемой в последние десятилетия областью физики и химии наноразмерного состояния. Структурная организация нанокomпозита – важная проблема, без решения которой сложно создать материал для конкретных практических

применений. В обзоре [1] подробно изложены исследуемые в последнее время методы управления морфологией и структурной организацией нанокomпозитов. В настоящее время используют такие основные синтетические подходы в получении нанокomпозитных материалов, как полимеризация в плазме, испарение атомарного металла с нанесением его на поверхность полимера, термическое разложение прекурсоров в присутствии полимеров и др.

Недостатком этих способов является неравномерность распределения компонентов в конечном материале, что приводит к неоднородности его свойств. Для устранения этих проблем были предложены и применяются три способа, позволяющие обеспечить гомогенное распределение неорганических частиц в полимерной среде: золь-гель-метод, интеркаляция полимеров и наночастиц в слоистые структуры, сочетание процессов полимеризации и формирования наноразмерных частиц.

В ряде случаев разработка саморегулирующихся систем, в которых синтез полимерной матрицы и рост наночастиц происходят одновременно, – лучшее решение проблемы получения нанокomпозитов с заданными свойствами. Целью таких исследований является создание нанокomпозиционной структуры типа «микрокапсулированная наночастица в полимерной оболочке» сформированной *in situ* (от лат. в реакционной смеси – прим. редактора). Предложено несколько способов для получения таких материалов [1–3]. Несмотря на разнообразие исследований, работ, посвященных оптическим наноматериалам, в которых высокая концентрация наночастиц сочетается с хорошими оптическими свойствами, мало. Проблема заключается в том, что обычно высокая концентрация неорганических добавок сопровождается значительным светорассеянием на них или флуктуациями их концентрации.

Наиболее важные и интенсивно исследуемые в последние годы – наночастицы ZnO и SiO₂. Интерес к ним объясняется их уникальными свойствами и возможностью использования в ультрафиолетовых излучателях, фотокатализе, фотозащите, пьезоэлектрических устройствах и химических сенсорах [4, 5]. Для изменения поверхностных и физико-химических свойств наночастиц используют методы химической адсорбции, привитую сополимеризацию, различные прекурсоры, изменяют параметры технологических процессов и т. д. [6, 7].

В данной работе проводились исследования в области получения гибридных полимерных материалов для применения в фотонике [8, 9]. Нанокomпозиты были приготовлены УФ-отверждением смеси акрилатных мономеров и готовых наночастиц. Показано, что наночастицы участвуют в процессе УФ-полимеризации. Введение в полимеризуемую композицию наночастиц ZnO или SiO₂, взаимодействующих с одним из мономеров композиции, приводит к образованию оптически однородных прозрачных и малорассеивающих нанокomпозитов с хорошими эксплуатационными свойствами. В частности, в данной работе приведены два примера практического использования разработанного состава: создана копия асферической линзы на основе материала с наночастицами ZnO и произведено склеивание различных блоков органического и неорганического стекла оптическим нанокomпозиционным клеем на базе наночастиц SiO₂.

Объект исследования: прозрачный нанокomпозиционный оптический клей на основе УФ отверждаемой мономерной акрилатной нанокomпозиции. Данная работа направлена на изучение возможности создания прозрачного оптического нанокomпозиционного клея с малой усадкой, высокой прочностью и термической стабильностью и показателем преломления, максимально приближенным к показателям преломления склеиваемых поверхностей.

Целью работы является разработка малоусадочного прозрачного нанокomпозиционного материала, в котором низкое содержание наночастиц обеспечивает значительное повышение твердости и понижение усадки. Разрабатываемый нанокomпозиционный материал

предназначен для склеивания прозрачных оптических деталей и для использования в стоматологической индустрии в качестве материала для пломбирования и восстановления зубов, а также для асферизации оптических покрытий.

Задачи работы:

- разработка технологии изготовления нанокompозиционного материала. Подбор материалов композиции и их процентного соотношения для достижения оптимальных характеристик материала: низкой усадки, высокой твердости, прозрачности;
- получение гомогенных нанокompозитов и исследование их оптических (показатель преломления, оптическое пропускание) и структурно-зависимых (жесткость, твердость, усадка) свойств;
- выбор оптимальных композиций и технологии изготовления нанокompозиционного клея;
- практическое использование разработанного материала для решения задачи склеивания крупногабаритных блоков двух типов: неорганическое (ОС-120) – органическое стекла ПММА К-208)и органическое (ПММА К-208) – органическое (ПММА К-208) стекла;
- экспериментальная проверка применимости нанокompозиционного клея для асферизации оптических покрытий.

Объекты исследования и методы

Материалы

Для создания нанокompозиционных материалов использовались вещества, представленные в Табл. 1.

Наночастицы ZnO повышают показатель преломления полимерного композита. При этом он остается прозрачным в УФ- и видимой областях спектра без изменения величины его светорассеяния. Наночастицы SiO₂ понижают показатель преломления композита, а сам он приобретает небольшой коэффициент термического расширения. В качестве мономерной композиции, подходящей для практического применения в данной работе была выбрана следующая: BisA / 2Car (30/70).

Таблица 1

Используемые вещества

Название	Производитель	Показатель преломления	Примечание
2-карбоксиэтилакрилат (2Car)	Aldrich, 552348	1.457	Поверхностно-активный жидкий моноакрилат, применяется для повышения адгезии к материалу подложки
Бисфенол А глицерола т (BisA)	Aldrich, 41,116-7	1.557	Жидкий диакрилат, применяется для образования поперечной сшивки
Оксид цинка (ZnO), 20 нм	ЗАО «Вектон»	2,1	Наночастицы, структурирующая добавка

Диоксид кремния (SiO ₂), 14 нм	Aldrich, 066K0110	1,460	Наночастицы, структурирующая добавка
2,2 диметокси-2-фенилацетофенон (InII)	Aldrich, 19,611-8		Фотоинициатор полимеризации, чувствительный в УФ-области спектра
Хлористый метилен (ДХМ)	ЗАО «Экос-1», ТУ 2631-019-44493179-98		Органический растворитель, используется для приготовления составов, содержащих от 6 вес. % наночастиц SiO ₂

Технология изготовления пленочных образцов

Нанокomпозиционный материал состоит из матрицы на основе двух акрилатных мономеров: поверхностно-активного 2-карбоксииэтилакрилата (2Car), бисфенол А глицеролата (BisA), образующего поперечную сшивку. Экспериментальным путем было определено оптимальное соотношение компонентов этой смеси: BisA /2Car (30/70). Затем в данную матрицу вводились наночастицы оксида цинка (ZnO) или диоксида кремния (SiO₂).

Было разработано несколько способов получения нанокomпозиционного материала: высокотемпературные (II, IV) и низкотемпературные (I, III). Для всех способов начальные условия одинаковы: производится нагрев ($t = 65^{\circ}\text{C}$) 2Car в течение 2 ч.; ZnO прокаливается при $t = 300^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч., а для SiO₂ прокаливания не требуется. При введении наночастиц SiO₂ необходимо предварительно их растворить в хлористом метиле (ДХМ). Ниже подробно описаны стадии приготовления нанокomпозита:

Способ [II] / [III]:

1. 2Car помещается в термостат на 10 мин. при $t = 100^{\circ}\text{C}$, затем в него небольшими порциями вводится [(ZnO или SiO₂)]/[BisA], при постоянном помешивании наночастицы растворяются в мономере в течение 15 мин.;
2. Полученный состав с момента полного растворения наночастиц выдерживается 1 ч. при температуре 100°C ;
3. Вводится [BisA]/[(ZnO или SiO₂)] и состав выдерживается еще 1 ч. в термостате при $t = 100^{\circ}\text{C}$;
4. Добавляется фотоинициатор 0,2 вес. % InII.

Способ [III] / [IV]:

1. 2Car помещается в термостат на 10 мин. при $t = 140^{\circ}\text{C}$, затем в него небольшими порциями вводится [(ZnO или SiO₂)]/[BisA], при постоянном помешивании наночастицы растворяются в мономере в течение 15 мин.;
2. Полученный состав с момента полного растворения наночастиц выдерживается 1 ч. при температуре 140°C ;
3. Вводится [BisA]/[(ZnO или SiO₂)] и состав выдерживается еще 1 ч. в термостате при $t = 140^{\circ}\text{C}$;
4. Добавляется фотоинициатор 0,2 вес. % InII.

Для данной работы предпочтительнее оказался низкотемпературный способ III, когда к смеси мономеров BisA / 2Car (30/70) присоединяются наночастицы. В этом случае обеспечивалось получение прозрачного, квазигомогенного нанокomпозиционного материала.

Для проведения дальнейших измерений свойств мономерные растворы помещались между двумя полиэстеровыми пленками и экспонировались излучением ртутной лампы ($\lambda = 365$ нм) в течение двух минут. Во время фотохимической полимеризации не весь композит переходит в твердую полимерную матрицу, структурированную наночастицами. Часть мономерной композиции остается незаполимеризованной. Поэтому завершающей стадией приготовления образцов является дополимеризация пленок в термостате в течение десяти минут при температуре ~ 70 °С.

Методы исследования

Для исследования свойств разработанных нанокomпозиционных материалов использовались следующие методы и приборы: измерения показателя преломления (рефрактометр Аббе), плотности методом гидростатического взвешивания (аналитические весы ВЛР-200), оптического пропускания (УФ-, видимый диапазон – Perkin Elmer, ИК-Фурье спектроскопия – ИК-Фурье-спектрометр, ФСМ-1201, ООО «Мониторинг»), определение усадки (проводилось по прогибу поверхности плоской пластины, формируемой из данного состава в ограниченном объеме под воздействием УФ-излучения), а также измерение твердости по методу Бринелля (измеритель твердости «Булат-Т1»).

Исследование структурирования композиционного полимерного материала при введении наночастиц

Исследована полимеризация на наночастицах ZnO и SiO₂. Достигнуто улучшение оптических и эксплуатационных свойств акрилатного полимерного материала путем введения в полимер наночастиц ZnO и SiO₂. Созданы нанокomпозиты на основе мономерной смеси (BisA / 2Car (30/70)) и структурирующей добавки: наночастиц ZnO (до 14 вес. %) и SiO₂ (до 12 вес. %).

При введении SiO₂ в мономерную композицию BisA / 2Car (30/70), начиная с концентрации 7 вес. %, происходит заметное увеличение вязкости растворов. При более высоких концентрациях (10 вес. % и выше) раствор приобретает характер малотекучего геля. Совместимость SiO₂ с системой BisA / 2Car (30/70) с образованием прозрачной пленки наблюдается до 12 вес. %. При дальнейшем введении в мономерную композицию BisA / 2Car (30/70) наночастиц SiO₂ при УФ-полимеризации образуются непрозрачные сильнорассеивающие пленки. Происходит расслоение системы, она становится гетерогенной.

При введении ZnO в мономерную композицию BisA / 2Car (30/70), начиная с концентрации 7 вес. %, происходит заметное увеличение вязкости растворов. При более высоких концентрациях (от 12 вес. %) раствор приобретает характер малотекучего геля. Совместимость ZnO с системой BisA / 2Car (30/70) с образованием прозрачной пленки наблюдается до 14 вес. %.

Все исследуемые пленки прозрачны в видимой и УФ-области спектра. При превышении 9 вес. % концентрации SiO₂ происходит уменьшение оптического пропускания.

Поскольку в данной работе в качестве практического использования разработанного нанокomпозиционного материала предлагается создание оптического клея и френелевских линз, то целесообразно исследовать их показатель преломления и величину светорассеяния.

На рис. 1 представлено изменение показателя преломления для полимерной матрицы BisA / 2Car (30/70) при введении различных концентраций наночастиц ZnO и SiO₂.

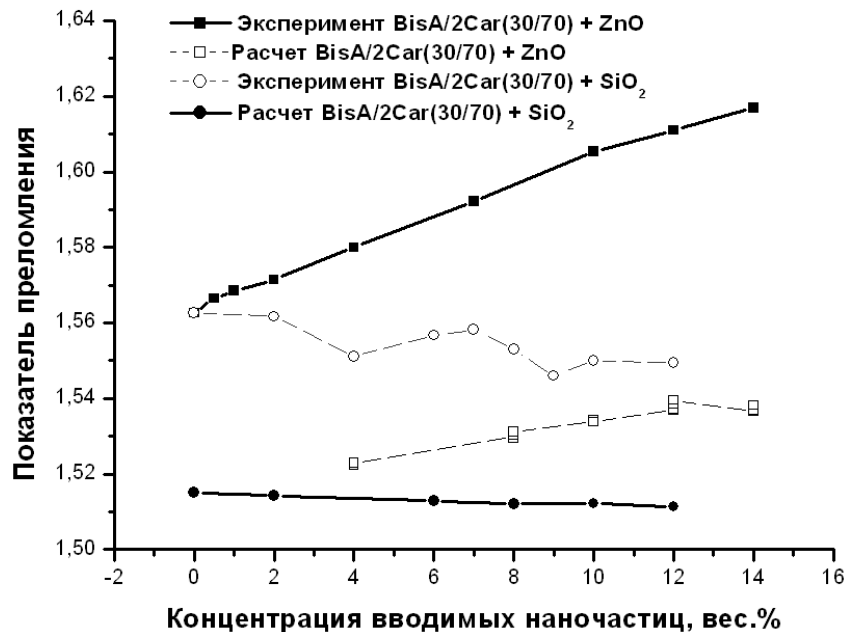


Рис. 1. Зависимость показателя преломления композиции BisA / 2Car (30/70) от концентрации наночастиц ZnO и SiO₂. Сплошные линии – показатели преломления, рассчитанные по модели эффективной среды Максвелла – Гарнета, пунктирные – экспериментальные данные

Поскольку показатель преломления ZnO (2,029) выше, чем у мономерной композиции, то введение окиси цинка будет повышать показатель преломления полученного нанокomпозита. На рис. 1 видно, что экспериментальный показатель преломления незначительно отличается от расчетного значения для состава BisA / 2Car (30/70). Введение 14 вес. % ZnO повышает его на 0,08.

Поскольку показатель преломления SiO₂ (1,46) ниже, чем у мономерной композиции, то его введение будет понижать показатель преломления полученного нанокomпозита. При введении 12 вес. % SiO₂ показатель преломления полимерного композиционного материала понижается на 0,04. Теоретический расчет показателя преломления нанокomпозиций производился при помощи модели эффективной среды Максвелла – Гарнета [10].

Некоторое расхождение теоретических и практических значений показателей преломления нанокomпозитов обусловлено тем, что в моделях предполагается отсутствие всякого взаимодействия наночастиц со средой. В действительности же присутствуют определенные типы взаимодействий наночастиц и полимерной матрицы, что подтверждается изображениями, полученными с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ).

Далее проводились исследования изменения величины светорассеяния полимеров в зависимости от концентрации введенных наночастиц до испытаний на влагопоглощение. Результаты приведены на рис. 2.

При введении наночастиц ZnO до 10 вес. % значение светорассеяния нанокomпозита увеличивается по сравнению с матрицей. До концентрации 10 вес. % из-за недостатка вводимой добавки ZnO структурированный полимерный композит неоднороден, что проявляется в немонотонном изменении величины светорассеяния. При концентрациях ZnO свыше 10 вес. % светорассеяние резко уменьшается, составляя примерно 1-2 %, что практически в два раза меньше светорассеяния ненаполненного полимера, и перестает зависеть от концентрации добавки.

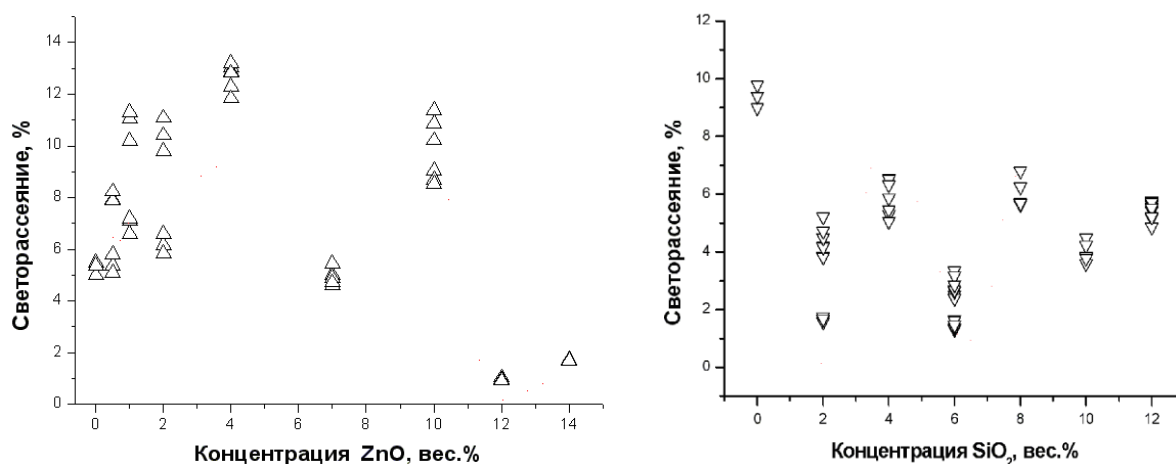


Рис. 2. Зависимость светорассеяния полимерной композиции BisA / 2Car (30/70) от концентрации наночастиц ZnO (слева) и SiO₂ (справа)

Введение добавки SiO₂ вызывает уменьшение светорассеяния композита. До концентрации 8 вес. % из-за недостатка вводимой добавки SiO₂ структурированный полимерный композит неоднороден, что проявляется в немонотонном изменении величины светорассеяния. При концентрации SiO₂ свыше 8 вес. % светорассеяние перестает зависеть от концентрации добавки. Наблюдается снижение рассеяния света нанокompозитом по сравнению с исходным материалом приблизительно в два раза.

Таким образом, для матрицы BisA / 2Car (30/70) для обоих видов наночастиц в определенном интервале концентраций можно говорить о равномерном распределении наночастиц в полимерной матрице с образованием низкорассеивающей квазигомогенной структуры: при концентрациях ZnO 10–12 вес. % и SiO₂ 8–10 вес. % (рис. 3).

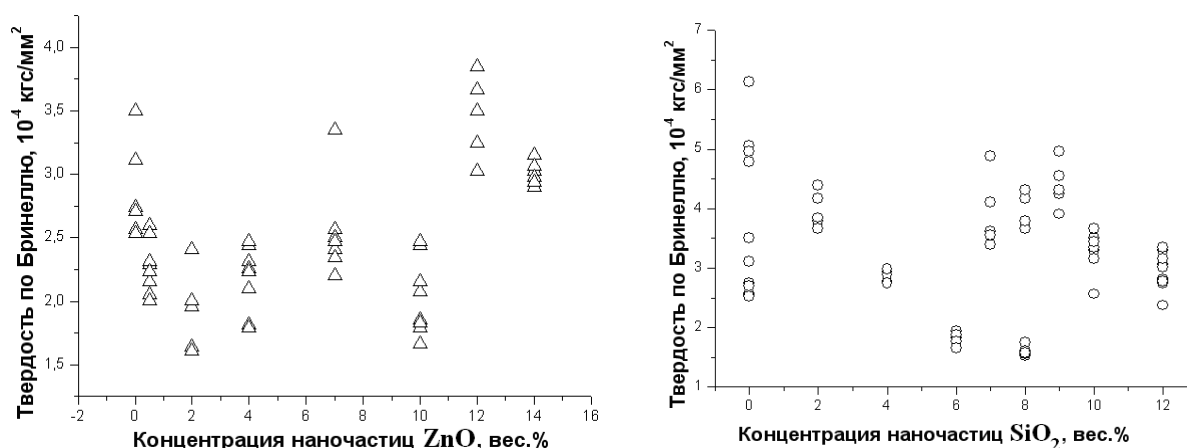


Рис. 3. Зависимость твердости по Бринеллю полимерных композиций от концентрации вводимых наночастиц: состава BisA / 2Car (30/70) + ZnO (слева); BisA / 2Car (30/70) + SiO₂ (справа)

Твердость полимерного композита с матрицей BisA / 2Car (30 / 70) при введении ZnO до 10 вес. % практически монотонно уменьшается (рис. 3а). ZnO формирует более рыхлый полимерный каркас композита, так как наночастиц недостаточно для равномерного распределения по всему объему материала. При более высоких концентрациях ZnO

происходит резкое упрочнение структуры полимерного материала в широком диапазоне толщин полученных из него пленок (от 10 мкм до 6000 мкм).

Твердость пленок при введении 2 вес. % SiO_2 резко возрастает по сравнению с исходной. В области концентраций 2–8 вес. % наблюдается резкое уменьшение твердости композита, то есть происходит разрыхление полимерного каркаса. При дальнейшем увеличении концентрации SiO_2 значения твердости начинают увеличиваться и при максимальном значении в 12 вес. % сопоставимы с величиной чистого полимера (рис. 3б).

Поскольку разработанный состав с наночастицами ZnO используется для создания оптических френелевских линз, то важно измерить усадку композита. Определение ее величины проводилось по значению прогиба поверхности плоской пластины, формируемой из данного состава в ограниченном объеме под воздействием УФ-излучения. Введение наночастиц уменьшает значение усадки вдвое: если для полимерной композиции BisA / 2Car (30/70) она составила 9,38 %, то для нанокompозита BisA / 2Car (30/70) + 10 вес. % ZnO усадка уменьшилась до значения 4,88 %.

В результате введения структурирующих наночастиц в полимерную композицию происходит переформирование ее структуры (укладки макромолекул) и, следовательно, изменение эксплуатационных свойств. При малых их концентрациях, наночастиц оказывается недостаточно для равномерного распределения по всему объему полимера, поэтому структура композита носит рыхлый неоднородный характер. С ростом концентрации наночастиц происходит такое изменение укладки макромолекул, при котором свободный объем системы монотонно уменьшается, структура полимера существенно отличается от исходной.

Изменение рельефа поверхности и внутренней структуры полимера при введении наночастиц были исследованы методами атомно-силовой микроскопии (рис. 4, 5).

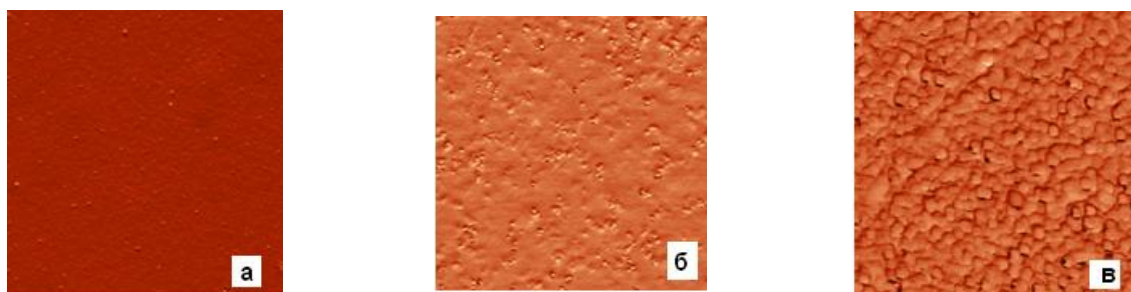


Рис. 4. Жесткость пленок состава BisA / 2Car (30/70) при введении 0 вес. % (а), 4 вес. % (б), 12 вес. % (в) наночастиц SiO_2

Как видно, уже при введении 4 вес. % наночастиц SiO_2 происходят существенные изменения структуры композиции по сравнению с чистым полимером. Отчетливо наблюдается формирование отдельных полимерных областей, структурированных SiO_2 . При введении 12 вес. % SiO_2 видна зернистая структура, равномерная по всему материалу. Она обусловлена как способностью наночастиц SiO_2 образовывать слабые связи с активными группами мономерных молекул, так и выступать в качестве центров полимеризации последних. При малых концентрациях наночастиц сосуществуют две фазы: полимерная и структурированная. Начиная с концентраций SiO_2 более 8 вес. %, практически исчезает свободная полимерная фаза, а весь имеющийся полимер образует сферы на наночастицах.

На рис. 5 четко видно, что в чистом полимере структура однородна. Уже при введении 4 вес. % наночастиц ZnO происходят существенные ее изменения. Отчетливо наблюдается

формирование отдельных полимерных областей, структурированных ZnO. При 10 вес. % ZnO заметна уже иная укладка макроцепей, равномерная по всему материалу.

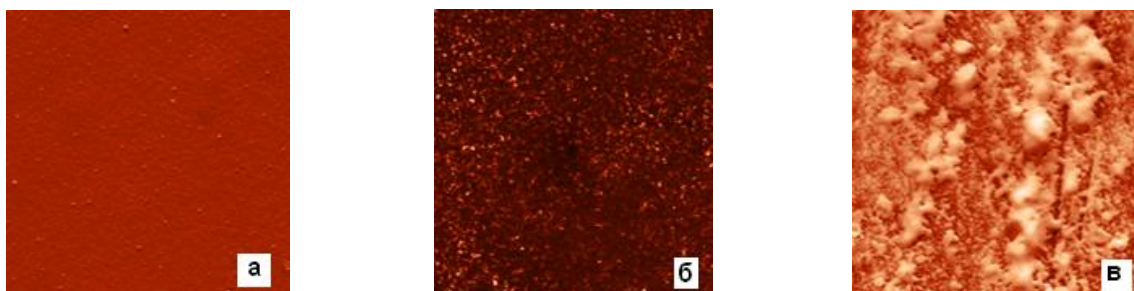


Рис. 5. Жесткость пленок состава BisA / 2Car (30/70) при введении 0 вес. % (а), 4-10 вес. % (б), 14 вес. % (в) наночастиц ZnO

Судя по приведенным микрофотографиям, имеет место самоорганизация наночастиц. Это естественно с учетом того, что каждая наночастица оказывается в центре образующейся вокруг нее сферы, которые имеют одинаковый радиус и укладываются в объем в некоторой упорядоченной структуре.

Механизм полимеризации мономерной смеси и на поверхности наночастиц ZnO был исследован методом ИК-спектроскопии (рис. 6).

Для мономерных композиций BisA / 2Car (30/70) на ИК-спектрах наблюдались полосы поглощения в области 1737 см^{-1} , 1410 см^{-1} , 1188 см^{-1} и 1050 см^{-1} (рис. 6а). Первая полоса характерна для валентных колебаний карбоксильной группы, тогда как последующие три обусловлены комбинацией плоских деформационных колебаний гидроксо-группы и валентных колебаний связи C-O в димерах карбоновых кислот. Интенсивный пик около 500 см^{-1} относится к Zn-O колебаниями в кристалле ZnO.

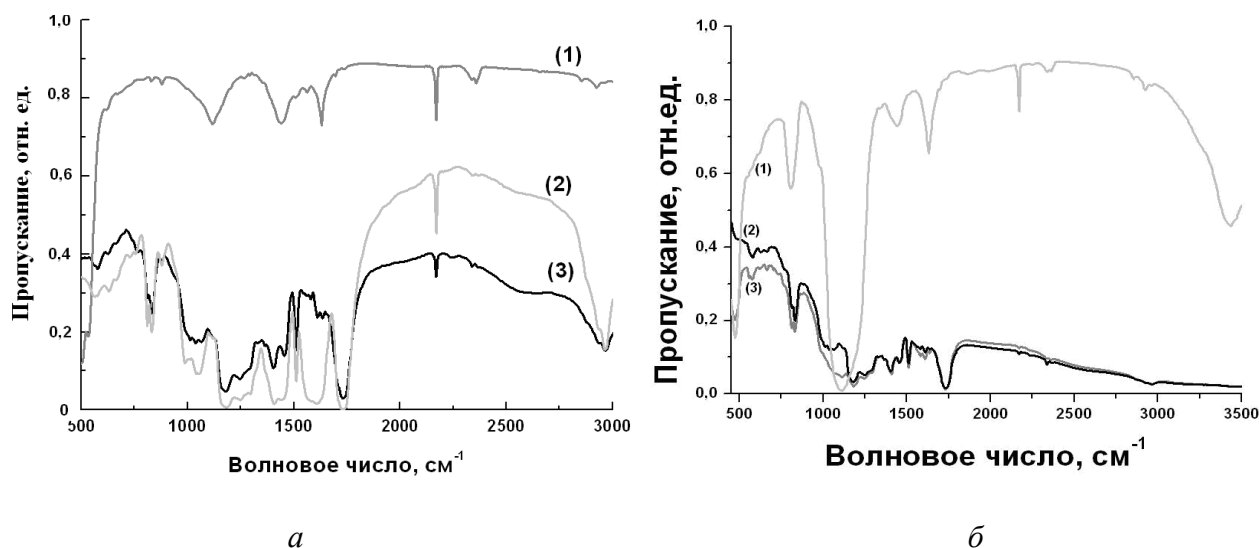


Рис. 6. Фурье-ИК спектр: а – наночастиц ZnO (1) композиции BisA / 2Car (30/70)+12 вес. % ZnO (2) и чистого полимера BisA / 2Car (30/70) (3); б – наночастиц SiO₂ (1) композиции BisA / 2Car (30/70)+8 вес. % SiO₂ (2) и для чистого полимера BisA / 2Car (30/70) (3)

На ИК-спектрах ZnO нанокomпозитов наблюдается значительное усиление интенсивности полос 1720 см^{-1} (группы C=O) и $1410\text{--}1450\text{ см}^{-1}$, соответствующих симметричным валентным колебаниям карбоксилат-аниона. Появляются такие эффекты, как

сохранение интенсивной полосы 500 см^{-1} , характерной для колебаний связи Zn-O в кристалле ZnO; наличие в полимерном нанокomпозите полосы поглощения $1620\text{--}1550\text{ см}^{-1}$ (область асимметричных валентных колебаний карбоксилат-аниона), увеличение интенсивности которой может быть связано с комплексообразованием между полимером и наночастицами.

Появление в спектрах полимерных нанокomпозитов вышеназванных полос поглощения означает возникновение концевых групп $\text{CH}_2 = \text{CHR}$. Эти группы могут быть сформированы в процессе полимеризации нанокomпозитов только на поверхности наночастиц оксида цинка, когда последний выступает в качестве фотокатализатора.

Возможности наночастиц SiO_2 образовывать как слабые связи с активными группами мономерных молекул, так и выступать в качестве центров полимеризации подтверждаются исследованием методом ИК-спектроскопии (рис. 6б). Полосы 471 см^{-1} и 1107 см^{-1} атрибутированы как полосы, характерные для валентных колебаний Si-O-Si групп на поверхности SiO_2 , а полоса 1737 см^{-1} – как валентные колебания C=O группы в акрилатах. Исчезновение мощных полос SiO_2 и значительное усиление интенсивности полосы карбонильной группы могут свидетельствовать о полимеризации на поверхности наночастиц и о взаимодействии COOH-групп мономера с наночастицами SiO_2 .

Из анализа оптических свойств для всех видов наночастиц и матриц в определенном интервале концентраций можно говорить о равномерном распределении наночастиц в полимерной среде с образованием низкорассеивающей квазигомогенной структуры. Наблюдаемая корреляция изменения твердости по Бринеллю и светорассеяния подтверждает предположения о структурирующем воздействии наночастиц на взаимное расположение макромолекул полимеров в обоих составах.

Нанокomпозиционные пленки прозрачны в видимой области спектра при достаточно высоких концентрациях наночастиц (до 14 вес. % для ZnO, до 9 вес. % для SiO_2). При концентрации SiO_2 свыше 9 вес. % наблюдается снижение рассеяния света нанокomпозитом по сравнению с исходным полимером примерно в два раза. При введении 12 вес. % SiO_2 показатель преломления полимерного композиционного материала понижается на 0,04. Введение ZnO линейно повышает показатель преломления композиции. При введении 14 вес. % ZnO он увеличивается на 0,08. При введении наночастиц в полимер немонотонно изменяются величины твердости по Бринеллю и светорассеяния нанокomпозита. Подобный характер изменения эксплуатационных характеристик пленок состава BisA / 2Car (30/70) в зависимости от концентрации наночастиц ZnO или SiO_2 позволяет сделать заключение о структурирующем влиянии добавки: происходит переформирование структуры (укладки макромолекул) в результате возможного взаимодействия наноструктурирующей добавки с активными группами полимера.

Основные результаты

Разработаны нанокomпозиционные материалы двух типов: с наночастицами SiO_2 и ZnO в мономерной матрице BisA / 2Car (30/70). Исследованы свойства данных композитов (светорассеяние, твердость по Бринеллю) и внутренняя структура (методами ИК-Фурье-спектроскопии и атомно-силовой микроскопии), измерен показатель преломления. На основе состава BisA / 2Car (30/70) + SiO_2 был получен квазигомогенный малорассеивающий и малоусадочный УФ отверждаемый нанокomпозиционный клей с высоким значением твердости. На основе состава BisA / 2Car (30/70) + ZnO были сформированы оптические элементы в виде комбинации стекло-полимер, получаемые нанесением фотополимера на

стеклянную подложку с последующим формированием необходимой оптической поверхности (асферика, френелевская оптика).

Нанокomпозиционный клей

Решена практическая задача склеивания крупногабаритных блоков двух типов: неорганическое (ОС-120) – органическое стекло (ПММА К-208) и органическое (ПММА К-208) – органическое (ПММА К-208) стекло. Для склейки данных оптических материалов оптимальным было бы использование УФ отверждаемых мономерных нанокomпозиций при условии подбора показателей преломления клея и оптического материала и обеспечения высокой адгезии к обеим склеиваемым поверхностям.

Были подобраны компоненты мономерной композиции, обеспечивающие адгезию к обеим поверхностям (органическому и неорганическому стеклу) и наночастицы SiO_2 для достижения необходимого показателя преломления. Экспериментальным путем в качестве оптического нанокomпозиционного клея была выбрана оптимальная нанокomпозиция BisA / 2Car (30 / 70) + 9 вес. % SiO_2 .

Адгезия к неорганическому стеклу обеспечивается введением в композицию мономера, имеющего концевые кислотные группы (2Car). Для адгезии к органическому стеклу вводится мономер с концевыми ароматическими группами (BisA). Необходимая величина показателя преломления композиции обеспечивается соотношением концентраций ароматического и алифатического мономеров, а также концентраций вводимых наночастиц, и может быть выбрана в диапазоне 1,49–1,59, что соответствует показателям преломления склеиваемых материалов.

Для склеивания пластин из оптического стекла УФ отверждаемая композиция заливается между ними и производится УФ-облучение композиции через одно из стекол, которое должно пропускать фотоактивное излучение. Толщина клеевого шва (0,1–1,0 мкм) определяется калиброванными прокладками из полимерной пленки, положенными между блоками.

Показатель преломления неотвержденной (жидкой) композиции составляет 1,51. При отверждении он повышается до 1,54. Эта величина весьма близка к показателю преломления оргстекла (1,5), что обеспечивает минимизацию отражений на границе склейки двух блоков. Отражение на границе оргстекло – стекло К-208 определяется разницей их показателей преломления и не может быть уменьшено выбором состава клея. Показатель преломления клея должен быть меньше показателя преломления материала, имеющего наибольшую его величину (рис. 7).

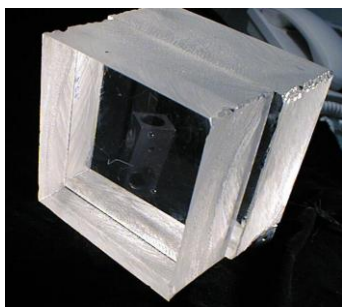


Рис. 7. Спектры пропускания склеенных блоков стекла: 1 – два склеенных блока органического стекла, 2 – блок оргстекла, склеенный с неорганическим стеклом

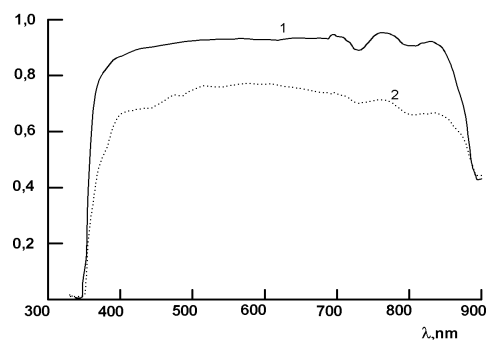


Рис. 8. Два блока ПММА, склеенные УФ отверждаемым композитом с подгонкой показателя преломления к показателю преломления ПММА

Измеренные спектры пропускания склеенных блоков показывают, что примененный клей не вносит заметного поглощения света в видимом диапазоне спектра. Потери света на отражение также незначительны (рис. 8).

Проведенные эксперименты показали возможность склейки крупногабаритных блоков стекла и оргстекла с использованием УФ отверждаемых композитов. Подобраны состав композиций, инициаторы отверждения, условия склеивания и источники УФ- излучения.

Асферизация оптики и коррекция поверхности оптических деталей

Асферизация оптики и коррекция поверхности оптических деталей необходимы для создания дешевой асферической оптики путем нанесения асферической поверхности на сферическую стеклянную линзу. Технология основана на использовании УФ отверждаемых композиций с регулируемым показателем преломления (1,48–1,6), что обеспечивает возможность подгонки показателей преломления УФ отверждаемой композиции к показателю преломления стекла. Схема асферизации стеклянной линзы представлена на рис. 9.

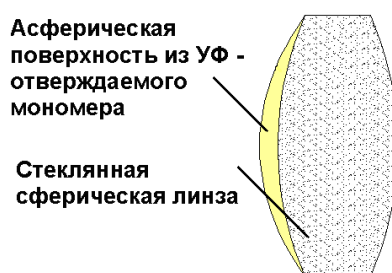


Рис. 9. Схема асферизации стеклянной линзы. Толщина асферизирующей поверхности – 50–500 мкм

В работе показана возможность копирования стеклянной асферической линзы с использованием УФ-отверждаемой композиции. Подобран оптимальный состав на основе мономерной нанокompозиции BisA / 2Car (30/70)+10 вес. % ZnO. Состав обеспечивает адгезию к стеклу и работоспособен в диапазоне от – 40 до + 120°C.

Асферическая оптика имеет высокую стоимость по причине сложного и трудоемкого процесса формирования асферических поверхностей, а использование УФ отверждаемых нанокompозитов позволило создать оптические элементы, в которых асферическая поверхность нанесена на обычную стеклянную линзу (рис. 10). В таких материалах обеспечивается низкое значение усадки (в данном случае для состава BisA / 2Car (30/70)+10 вес. % ZnO оно составляет 5 %) по сравнению с классическими технологиями изготовления копий линз.



а



б

Рис. 10. Лабораторный образец – асферизация стеклянной линзы: а – асферическая линза (оригинал); б – асферическая поверхность, нанесенная на обычную стеклянную линзу (копия)

Используя разработанный нанокompозит, можно получать комбинированные элементы, сочетающие традиционную, асферическую и френелевскую оптику. Такой элемент может быть

эквивалентен объективу, состоящему из нескольких обычных стеклянных линз. Это может быть, например, линза, на одну из сферических поверхностей которой нанесен френелевский элемент. Комбинированный оптический элемент изготавливается только по данной технологии. При этом стоимость такого элемента будет достаточно низкой.

Заключение

Разработаны прозрачные в видимом и УФ-диапазонах спектра полимерные нанокomпозиты на основе мономерной акрилатной композиции BisA2 / 2Car (30/70) с модификацией ZnO и SiO₂. Исследованы зависимости изменения твердости по Бринеллю, оптического пропускания, показателя преломления и светорассеяния в нанокomпозитах от концентрации наночастиц.

Достигнуто понижение уровня светорассеяния. При концентрации наночастиц SiO₂ свыше 9 вес. % наблюдается снижение рассеяния света нанокomпозитом по сравнению с исходным полимером примерно в два раза, что может быть обусловлено структурирующим действием наномодификатора.

При введении 12 вес. % SiO₂ показатель преломления полимерного композиционного материала понижается на 0,04 в соответствии с соотношением показателей преломления обоих компонент. При введении 14 вес. % ZnO показатель преломления увеличивается на 0,08. Линейность изменения показателя преломления составов подтверждает оптическую однородность среды.

Значения твердости по Бринеллю при максимальных концентрациях не превышают твердость чистого полимера, что свидетельствует о равномерном распределении покрытых оболочкой наночастиц в объеме полимера.

Наблюдаемая немонотонность изменения свойств, микрофотографии пленок (АСМ) и ИК-спектры свидетельствуют о структурировании полимерного каркаса при введении наночастиц. По данным АСМ видно, что вокруг наночастиц образуется ориентированная область – наночастицы структурируются с полимером без агломерации. Исследования, проведенные методом ИК-спектроскопии, подтверждают способность наночастиц оксида цинка образовывать связи с карбоксильной группой одного из мономеров акрилатной смеси.

Выбраны материалы композиции и их процентное соотношение для достижения оптимальных характеристик материала: низкой усадки (в два раза ниже, чем у чистой полимерной матрицы), высокой твердости при толщинах образца 10–6000 мкм, прозрачности. В качестве полимерной матрицы использован состав BisA / 2Car в соотношении (30/70), в который введены наночастицы ZnO (оптимальная концентрация 10 вес. %) или SiO₂ (оптимальная концентрация 8 вес. %).

Разработана технология создания нанокomпозиционного клея: при температуре 100 °С к смеси мономеров BisA / 2Car (30/70) присоединяются наночастицы. При данной технологии обеспечивалось получение прозрачного, квазигомогенного нанокomпозиционного материала. Решена задача склеивания крупногабаритных блоков двух типов: неорганическое – органическое стекла и органическое – органическое стекла при использовании разработанного нанокomпозиционного клея на основе состава BisA / 2Car (30/70) + 9 вес. % SiO₂;

На основе состава BisA / 2Car (30/70)+10 вес. % ZnO проведена экспериментальная проверка применимости нанокomпозиционного клея для асферизации оптических покрытий: показана возможность копирования стеклянной асферической линзы с использованием УФ отверждаемой композиции.

Разработанные композиты, модифицированные введением различных наночастиц, могут быть использованы в стоматологии в качестве УФ отверждаемого материала для пломб.

Публикации

1. Семьина С.А. Исследование структуры и свойств оптических УФ-отверждаемых акрилатных полимеров, наполненных наночастицами ZnO // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Вып. 51. Научные школы в СПбГУ ИТМО. СПб., 2008. С. 207–213.
2. Семьина С.А., Бурункова Ю.Э., Капорский Л.Н., Левичев В.В. Наномодифицированные оптические акрилатные композиты // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 10. С. 54–59.
3. Semina S.A., Burunkova J.A., Denisyuk I.Y. Self-organization of ZnO nanoparticles on UV-curable acrylate nanocomposites // Journal of nanotechnology. 2011. Vol. 1. P. 1–6.
4. Семьина С.А., Денисюк И.Ю., Бурункова Ю.Э. Исследование влияния наночастиц SiO₂ на самоорганизацию акрилатных композитов, отверждаемых ультрафиолетовым излучением // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 2. С. 67–71.

Литература

1. Rosenberg A.S., Dzhardimalieva G.I., Pomogailo A.D. Polymer composites of nano-sized particles isolated in matrix // Polymers for advanced technologies. 1998. Vol. 9. № 8. P. 527–535.
2. Pomogailo A.D., Savost'yanov V.S. Synthesis and polymerization of metal-containing monomers. Boca Raton, 1994. – 164 p.
3. Pomogailo A.D., Rozenberg A.S., Dzhardimalieva G.I., Leonowicz M. Polymer nanocomposites on the base of metal carboxylates // Advances in materials science. 2001. Vol. 1. № 1. P. 19–27.
4. Fang X., Bando Y., Gautam U.K. ZnO and ZnS nanostructures: Ultraviolet-light emitters, lasers, and sensors // Critical reviews in solid state and materials sciences. 2009. Vol. 34. № 3–4. P. 190–223.
5. Liu P., Wang T. Poly (hydroethyl acrylate) grafted from ZnO nanoparticles via surface-initiated atom transfer radical polymerization // Current applied physics. 2008. Vol. 8. № 1. P. 66–70.
6. Li Y., Li G., Yin Q. Preparation of ZnO varistors by solution nano-coating technique // Materials Science and Engineering B. 2006. Vol. 130. № 1–3. P. 264–268.
7. Vaezi M.R., Sadrnezhad S.K. Nanopowder synthesis of zinc oxide via solochemical processing // Materials & Design. 2007. Vol. 28. № 2. P. 515–519.
8. Williams T.R., Denisyuk I.Yu., Burunkova J.E. Filled polymers with high nanoparticles concentration – synthesis, optical and rheological properties // Journal of applied polymer science. 2010. Vol. 116. № 4. P. 1857–1866.
9. Burunkova J.A., Denisyuk I.Yu., Arefeva N.N., Semina S.A. Influence of SiO₂ nanoaddition on the self organization via UV-polymerization of acrylate nanocomposites // Molecular crystals and liquid crystals. 2011. Vol. 536. № 1. P. 10–16.
10. Виноградов А.П. Электродинамика композитных материалов. М., 2001. – 208 с.



Тишкин Виталий Олегович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: tiviol@gmail.com

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДИК ОБЪЕМНОГО СКАНИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.О. Тишкин

Научный руководитель – доктор физико-математических наук П.А. Белов

Введение

Основная проблема 3D-сканирования – это разнообразие типов и форм, доступных для съемки объектов. Усовершенствования на аппаратном и программном уровнях не решают данной проблемы в полной мере, поэтому требуется разработка специальных методов сканирования, а также обработки получаемых данных.

Задачей данного проекта является разработка методик трехмерного сканирования, отвечающих современным тенденциям развития технологии, с одной стороны, и повышающих качество получаемых электронных копий, с другой.

В процессе исследований использовались 3D-сканеры фирмы Konica Minolta (модели VI-910 и VI-9i), а также ручной сканер фирмы Creaform (модель REVscan). Все методики были опробованы на программных пакетах RapidForm 2006 и RapidForm XOR.

Методика регистрации точности сканера по координате Z

В общем виде разработанная методика сводится к выполнению следующих операций:

- сканирование эталонного образца, в качестве которого берется плоская керамическая либо металлическая пластина (сканирование ведется относительно нормали к ней);
- экспортирование полученных данных в программу (в этом исследовании использован программный пакет RapidForm XOR2);
- задание виртуальной эталонной плоскости относительно полученных данных. Сканируемая часть эталона плоская. Относительно нее программа может определить геометрическую плоскость (рис. 1);

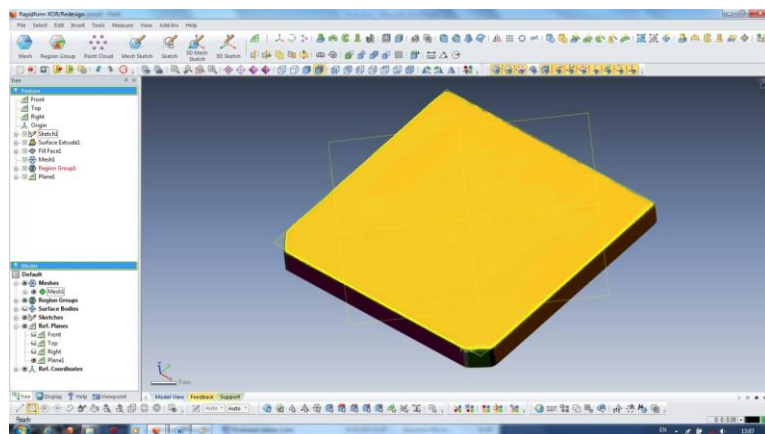


Рис. 1. Задание в программе RapidForm XOR геометрической плоскости

- создание параметрической, т. е. математически описанной плоскости по эталонной. Геометрическая плоскость не является объектом в машинной графике, поэтому требуется плоскость, описанная математическими функциями (рис. 2);

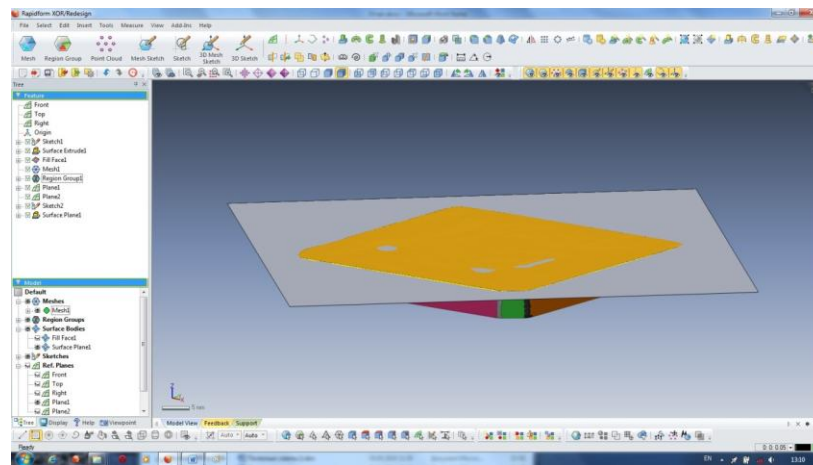


Рис. 2. Задание в программе RapidForm XOR параметрической плоскости

- запуск процедуры расчета расхождения отсканированной и математически построенной плоскостей. Для этого используется встроенный в RapidForm XOR программный модуль Accuracy Analyzer (рис. 3);

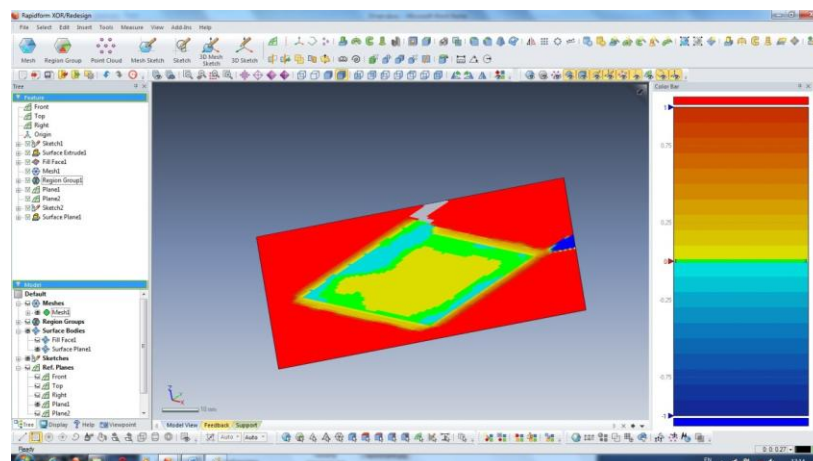


Рис. 3. Отображение на экране результата работы Accuracy Analyzer

- накопление статистического материала;
- обработка статистического материала.

Доступность и простота данной методики позволяют в короткие сроки провести диагностику прибора с целью выявления отклонений от паспортных данных и, как следствие, модифицировать методику сканирования.

Создание электронных копий объектов технического типа

На сканирование и обработку объектов технического типа накладываются определенные ограничения ввиду сложности форм и наличия большого числа острых углов и граней.

Методика сканирования заключается в съемке минимум с восьми ракурсов по периметру объекта на одном уровне (рис. 4). Количество уровней зависит от габаритов изделия. В случае плоскостной модели количество ракурсов уменьшается до четырех.

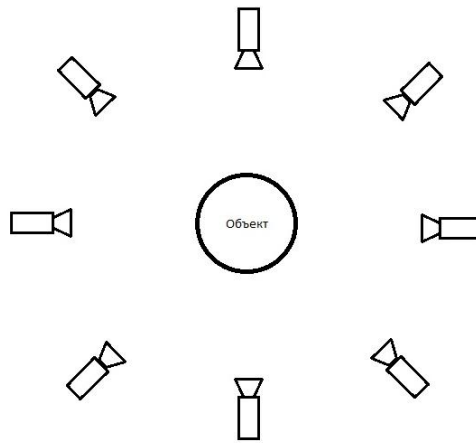


Рис. 4. Ракурсы съемки при виде сверху

Такое плотное сканирование позволяет снять объект практически не оставляя теневых, то есть неотсканированных участков. Однако при этом обработка данных будет усложнена наличием большого количества «шумов» (искажений) на острых частях объекта. Методика обработки отсканированного изображения сводится к следующим операциям:

- сопоставление сканов, имеющих общую поверхность (термин «скан» является аналогом термина «снимок» в фотографировании, но в виду принципиальной разницы получаемых данных [двумерное фотоизображение в фотографировании и трехмерная копия определенной площади поверхности в 3D-сканировании] в данном случае корректнее применять термин «скан»);
- математический расчет соединения, который позволяет произвести обсчет формы поверхности одного скана относительно формы поверхности другого для последующего более точного их соединения;
- запуск процедур на обработку «шумов»;
- удаление оставшихся «шумов» вручную;
- объединение сканов в единое целое;
- обработка поверхности (сглаживание, доработка теневых участков, оптимизация сетки).

Как правило, электронные копии технических объектов нужны в формате параметрической модели. Для их создания не требуется кропотливой обработки. Вполне достаточно сгладить мелкие неровности в автоматическом режиме. Далее такая модель экспортируется в специальное программное обеспечение по созданию параметрических моделей из полигональных. Методика обработки в таких программах требует отдельного описания.

Сканирование и обработка моделей художественного типа

Для создания электронных копий художественных изделий необходима следующая последовательность действий:

- сканирование

Процесс регистрации поверхности сканируемого изделия будет зависеть от его степени объемности. В случае полнообъемных объектов, например статуй, сканирование будет проходить со всех возможных ракурсах вокруг модели. В случае же регистрации поверхности плоскостных объектов, например лепнины, количество ракурсов съемки будет не более трех;

- импорт в программное обеспечение, удаление текстур

Некоторые сканеры позволяют получить сканы с наложенными текстурами, при этом в подавляющем большинстве случаев текстуры являются излишними данными, поэтому их следует удалять во время импортирования;

- сопоставление;
- математический расчет соединения;
- удаление пересечений

При сопоставлении возникают места больших площадей наложения двух или более поверхностей. Такие места необходимо удалять, во-первых, для освобождения пространства памяти, а следовательно, для уменьшения времени на обработку программой тех или иных действий, и, во-вторых, для того чтобы избежать возможных ошибок (при наложении одной поверхности на другую) во время процедуры сшивания в единое целое;

- сшивка

Процедура сшивки позволяет соединить два или более сканов в единое целое. На данном этапе мы получаем единую копию отсканированной поверхности;

- обработка отверстий

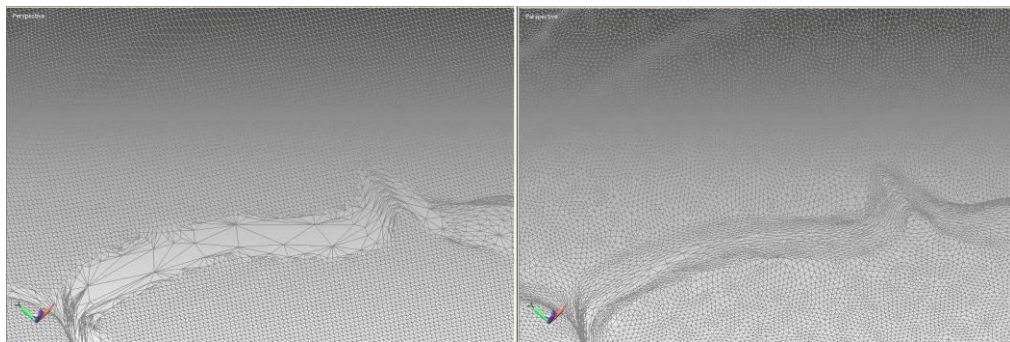
На поверхности практически любого объекта существуют такие места, сканирование которых так или иначе невозможно (отрицательные углы, высокая глубина рельефа), поэтому во всех пакетах для 3D-сканирования существует функция «зашивания» отверстий;

- сглаживание

Процедура сглаживания позволяет убрать шероховатости поверхности компьютерной копии, возникающие либо в случае погрешностей сканеров, либо вследствие специфики сканируемой поверхности. С другой стороны, являясь, по сути, функцией деформации, сглаживание дает возможность исправления возникающих во время сшивания программных ошибок;

- пересчет полигональной поверхности (ретриангуляция)

Такая функция позволяет перестроить структуру полигональной сетки с тем, чтобы придать ей однородный вид. Обработку такой сетки (в частности следующей процедурой) можно вести более тонко (рис. 5);



а

б

Рис. 5. Ретриангуляция: а – до процедуры, б – после процедуры

- локальная деформация поверхности и сглаживание вручную

Используя эти функции, можно достраивать недостающие элементы поверхности, а также исправлять программные ошибки и ошибки, вызванные погрешностью прибора.

Предлагаемый метод позволяет сократить время на обработку данных за счет использования функций соединения и математического расчета соединения, а также повысить

качество получаемых моделей-копий, за счет предложенного алгоритма работы с поверхностью. Под качеством при этом необходимо понимать однородность, ровность поверхности, отсутствие дыр.

Предложенная методика была опробована в следующих работах.

1. Копирование и физическое воспроизведение скульптур в городах Пушкин и Гатчина;

- Скульптура «*Prima Vera*».

На сканирование объекта ушло 4-5 ч. Обработка полученных данных заняла около 48 ч. (7 рабочих дней) (рис. 6).

Полученная электронная модель-копия в дальнейшем была использована итальянскими реставраторами для воспроизведения физической копии на пятикоординатном станке с ЧПУ.



a

б

Рис. 6. «*Prima Vera*»: *a* – В процессе сканирования, *б* – полученная электронная копия

- Скульптура «*Зефир, качающийся на ветке*»

На сканирование объекта ушло 4-5 ч. Обработка полученных данных заняла около 58 ч. (9 рабочих дней) (рис. 7).



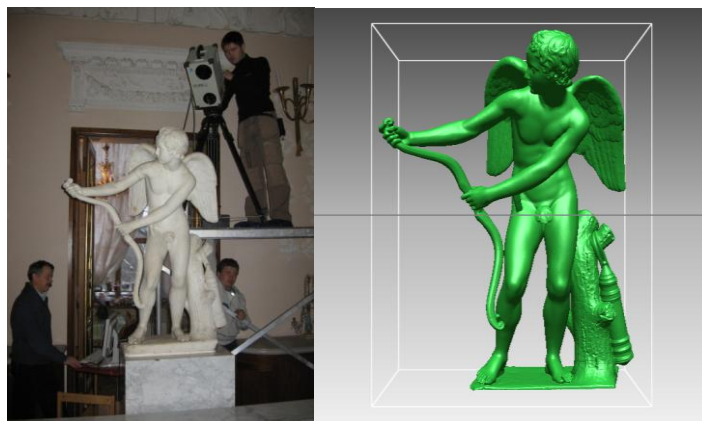
a

б

Рис. 7. «*Зефир, качающийся на ветке*»: *a* – оригинал, *б* – электронная копия

- Скульптура «*Эрот*»

На сканирование объекта ушло 4,5 ч. Обработка полученных данных заняла около 43 ч. (6 рабочих дней) (рис. 8).



а

б

Рис. 8. «Эрот»: а – в процессе съемки, б – электронная копия

2. Аналогичной была работа, связанная с реставрацией памятников в Некрополе при Свято-Троицкой Александро-Невской лавре. Был отсканирован надгробный памятник тайного возлюбленного императрицы Елизаветы Алексеевны А.Я. Охотникова, электронная копия которого в дальнейшем использовалась для проведения «компьютерной реставрации», а также расчета стоимости проведения физической реставрации.

3. Выполнено 3D-сканирование элементов куполов церкви при Екатерининском Дворце в г. Пушкин для определения точных площадей поверхностей покрываемых золотом в процессе реставрации (рис. 9, 10).



Рис. 9. Реставрируемые элементы декора на куполах

На сканирование двух элементов общей площадью около $1,5 \text{ м}^2$ каждый ушло 10 ч. Обработка полученных данных заняла 6 ч.

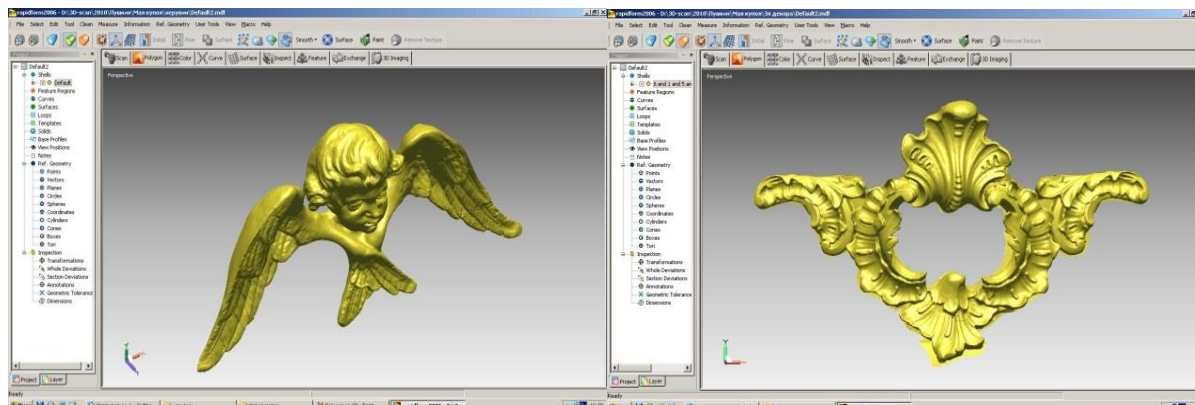


Рис. 10. Электронные копии элементов декора

4. В настоящее время ведутся работы по съемке интерьеров залов Дома архитекторов с целью создания электронной базы элементов декора (рис. 11).

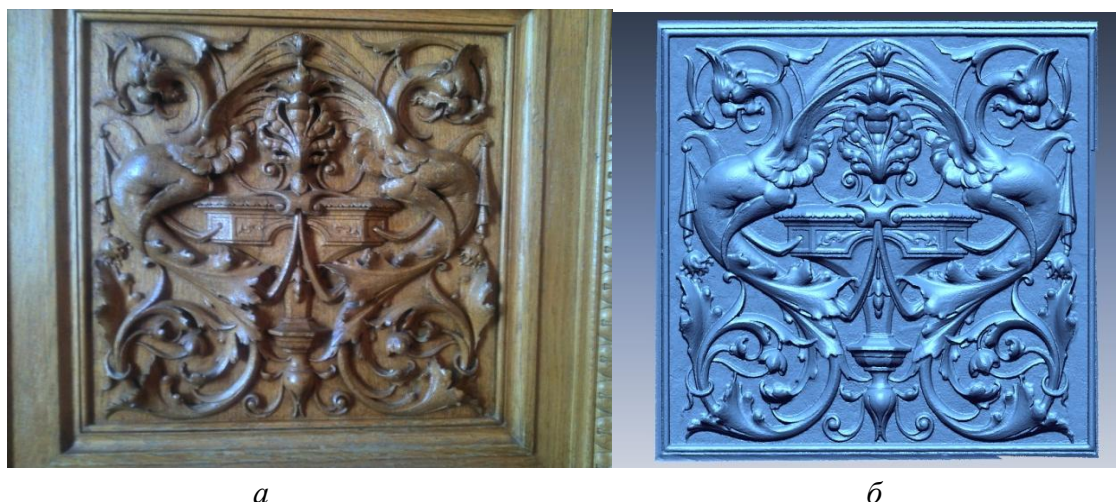


Рис. 11. Накладка на двери: а – оригинал, б – электронная копия

Исследование возможностей объемного сканирования частей человеческого тела

В рамках диссертационной работы были проведены практические исследования объектов сложной формы (плеча, предплечья и кистей рук мужчины и женщины) с целью их оцифровки с использованием 3D-сканеров бесконтактного типа.

Для оцифровки поверхности плеча и предплечья рук использовался бесконтактный лазерный сканер Handyscan 3D REVscan канадской компании Creaform. За счет применения специальных позиционных маркеров данный прибор позволяет отсканировать однородные поверхности с высокой скоростью. В результате этого мы получаем достаточное для таких объектов качество сетки трехмерной модели.

Оцифровка поверхностей кистей рук мужчины и женщины проводилась с помощью бесконтактного лазерного сканера VI-910 производства японской корпорации Konica Minolta, т. к. для этой части человеческого тела требуется более высокая плотность полигональной сетки. В результате работы было получено необходимое количество сканов поверхностей рук.

Методика обработки включает в себя следующие действия:

- сопоставление сканов;
- математический расчет сопоставленных элементов;
- удаление пересечений в местах наложения двух или более поверхностей;
- применение процедуры «ручного» перемещения отдельных элементов объекта в трех направлениях, а также вращения их в трех плоскостях («ShellTrackball» в RapidForm 2006). Это дает оператору возможность более точного сопоставления двух отдельных элементов в процессе всей сборки сканов в единое целое.
- объединение нескольких сканов в единое целое.
- обработка отверстий;
- автоматическое и ручное сглаживание неровностей поверхности;
- пересчет полигональной поверхности.

Были получены трехмерные модели рук мужчины и женщины в статическом и динамическом состояниях (рис. 13, 14), а также описана методика применения технологий 3D-сканирования с целью получения точных электронных копий частей тела человека

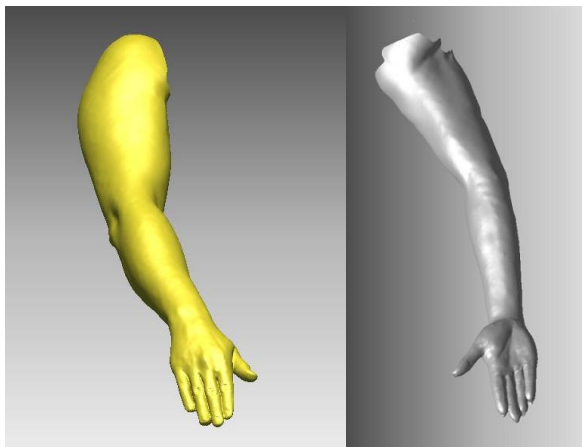


Рис. 13. 3D-модели рук мужчины и женщины в статике

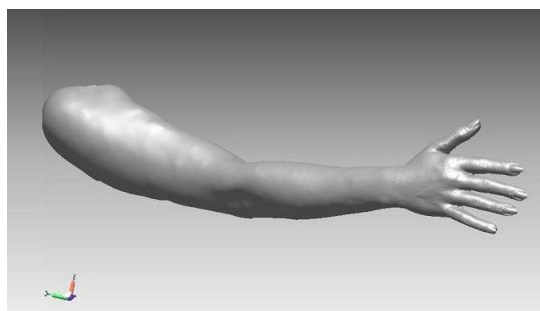


Рис. 14. 3D-модель женской руки в динамике

Влияние цвета объекта на точность получаемой электронной копии

Методика исследования состоит из следующих последовательных частей:

- использование 3D-сканера:
 - а) получение электронной копии заданной части эталона за один скан;
 - б) сохранение данных сканирования без обработки.
- использование специального программного обеспечения:
 - а) разбиение электронной копии на регионы;
 - б) построение осей цилиндров;
 - в) построение плоскости;
 - г) построение точек пересечения плоскости и осей;
 - д) нахождение расстояния между точками.
- обработка полученных данных:
 - а) нахождение погрешности каждого измерения;
 - б) вычисление среднего значения погрешности;
 - в) вычисление среднеквадратического отклонения.

В качестве исследуемого прибора был использован 3D-сканер Konica Minolta модели VI-910. В его комплект входят три сменные линзы для съемки разных площадей поверхности. Они дают разные погрешности, поэтому было проведено по сто измерений на каждой из них с разными фокусными расстояниями.

Результаты для белой матовой поверхности приведены в Табл. 1.

В настоящее время ведется накопление статистического материала для случая красной и абсолютно черной поверхностей.

Таблица 1

Отклонения по оси X

Линза	Фокусное расстояние, мм	Среднее значение погрешности, мм	Среднеквадратическое отклонение, мм
Middle	500	0,1648	0,01
Middle	640	0,4227	0,069
Middle	800	0,5122	0,008
Wide	500	0,1393	0,046
Wide	640	0,13	0,049
Wide	800	0,3587	0,1
Tele	800	0,17	0,0063
Tele	1424	0,6687	0,01

Отклонения по оси Y

Линза	Фокусное расстояние, мм	Среднее значение погрешности, мм	Среднеквадратическое отклонение, мм
Middle	500	0,1733	0,013
Middle	640	0,414	0,04
Middle	800	0,5	0,02
Wide	500	0,1282	0,048
Wide	640	0,1187	0,05
Wide	800	0,348	0,1
Tele	800	0,159	0,013
Tele	1424	0,6576	0,015

Результаты

К основным результатам работы следует отнести следующие:

- разработана методика регистрации точности сканера по координате Z;
- разработаны методики сканирования и обработки моделей технического и художественного типов, а также подвижных моделей (частей тела человека);
- исследовано влияния цвета объекта на точность получаемой электронной копии.

Одним из больших плюсов предлагаемых методик является возможность их применения практически во всех программных пакетах для 3D-сканирования, т. к. для всех вариантов используются стандартные процедуры.

Кроме того, они значительно упрощают процесс получения электронных копий любых физических объектов, а также позволяют вести обработку данных для получения максимально возможного их качества.

Публикации

1. Разина Е.В., Семенова В.В., Тишкин В.О. Методика применения бесконтактных лазерных 3D-сканеров Handyscan 3D REVscan и Konica MinoltaVI-910 с целью получения антропометрических характеристик тела человека // Вестник СПбГУТД. – СПб., 2011. № 11 (Серия 1). – С. 83–93.
2. Тишкин В.О., Разина Е.В. Объемное сканирование тела человека // Диалоги о науке. – СПб., 2011. № 2. – С. 39–41.



Тургалиева Татьяна Валерьевна
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: kopylova_tv@mail.ru

ТРЕХКООРДИНАТНАЯ АВТОКОЛЛИМАЦИОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ УГЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Т.В. Тургалиева

Научный руководитель – профессор И.А. Коняхин

Введение

Безопасная эксплуатация объектов в таких областях промышленности, как машиностроение, зачастую невозможна без контроля угловых деформаций и смещений их элементов. В последнее время возрастает потребность в устройствах, выполняющих контрольно-измерительные процедуры по определению углового пространственного положения объектов контроля относительно некоторой базы.

Для решения задач, связанных с угловыми измерениями, используются одно- и двухкоординатные автоколлиматоры. Применяемые системы позволяют контролировать положение объекта только относительно одной или двух осей, перпендикулярных оптической оси системы (коллимационные оси). Вместе с тем часто возникает необходимость контроля поворотов объекта и относительно оптической оси системы (оси скручивания). Для одновременного измерения коллимационных углов и угла скручивания, как правило, применяется еще один автоколлиматор с дополнительным отражателем, расположенный ортогонально первому. Это усложняет процесс измерения и увеличивает габариты измерительного комплекса. В ряде случаев использование второго автоколлиматора невозможно. Поэтому перспективными являются трехкоординатные автоколлимационные системы по схеме с единым автоколлиматором.

Такие устройства позволяют реализовывать дистанционные, независимые и высокоточные измерения, автоматизировать процесс снятия данных и повысить достоверность получаемой информации. Предлагаемая система должна облегчить решение современных проблем, стоящих перед приборостроением в области создания высокоточных систем контроля.

Целью проекта является проведение экспериментальных исследований трехкоординатной автоколлимационной системы контроля угловых деформаций промышленных объектов.

В рамках работы решаются следующие задачи:

- разработка методики проведения экспериментальных исследований системы;
- проведение по этой методике экспериментальных исследований системы в лабораторных условиях;
- анализ параметров системы с целью выявления факторов, влияющих на точность измерений;
- определение погрешности системы.

Разработка методики проведения экспериментальных исследований и анализ параметров трехкоординатной автоколлимационной системы контроля угловых деформаций промышленных объектов

Анализ характеристик трехкоординатной автоколлимационной системы

Разработана схема трехкоординатной автоколлимационной системы [1, 2, 3], позволяющая измерять три угловые координаты объекта. В качестве контрольного элемента (КЭ) системы, устанавливаемого на объекте, используется тетраэдрический отражатель (ТО), у которого два из двугранных углов между отражающими гранями имеют заданное отступление $\delta_2 = \delta_3 = \delta$ от 90° (рис. 1а) [1, 2]. ТО разделяет падающий по оси пучок автоколлиматора на две пары пучков, одна из которых может использоваться для измерения угла скручивания. Коллимационные углы измеряются по части пучка, отраженного от фронтальной грани ТО как от автоколлимационного зеркала.

Чувствительность автоколлимационной системы при измерении угла скручивания Θ_3 (рис. 1) определяется коэффициентом передачи между углом поворота отражателя и углом отклонения отраженного пучка численно равным величине Δ [2, 4].

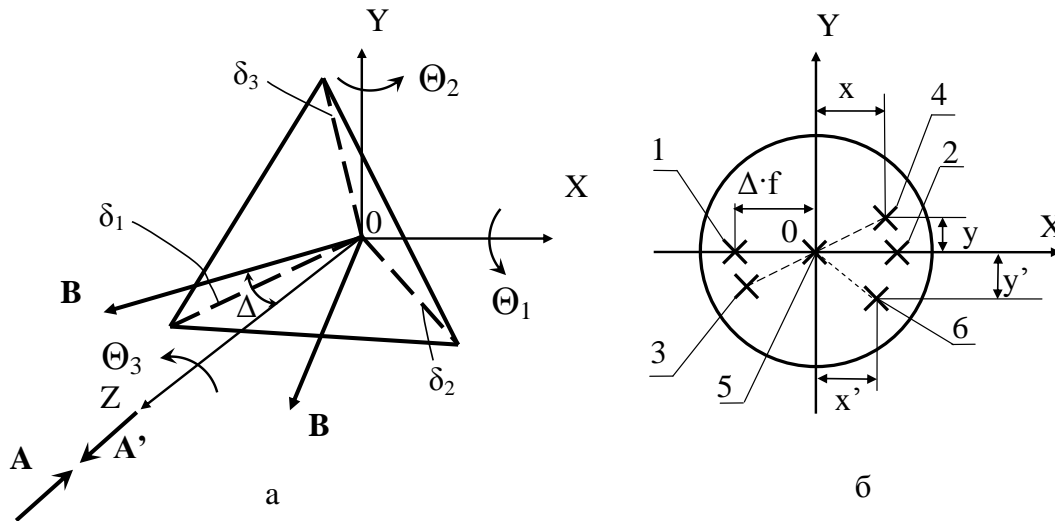


Рис. 1. а – тетраэдрический отражатель, б – изображение марки автоколлиматора в фокальной плоскости приемного объектива: 1, 2, 5 – изображения при $\Theta_3=0$, $\Theta_1=\Theta_2=0$; 3, 4 – при $\Theta_3 \neq 0$; 6 – при $\Theta_1 \neq 0$, $\Theta_2 \neq 0$

Каждый из пучков пары для измерения угла скручивания Θ_3 составляет с осью объектива автоколлиматора угол Δ , который численно равен коэффициенту передачи между углом поворота ТО на угол скручивания и отклонением отраженного пучка от первоначального направления и, соответственно, определяет чувствительность измерения скручивания.

Отраженные пучки строят в фокальной плоскости объектива автоколлиматора изображения марки (рис. 1б, поз. 1, 2). В свою очередь пучок, используемый для измерения коллимационных углов, строит изображение марки в центре анализатора (рис. 1б, поз. 5).

При повороте объекта, с которым связан ТО, на малые углы Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 (рис. 1а) относительно осей OX, OY, OZ изображения (рис. 1б, поз. 1, 2) сместятся на величину $\pm y$, пропорциональную углу Θ_3 (рис. 1б, поз. 3, 4). При этом изображение (рис. 1б, поз. 5) сместится на величины x' и y' , пропорционально углам Θ_2 и Θ_1 соответственно (рис. 1б, поз. 6).

Тогда орт \mathbf{B} отраженного пучка определяется из следующего выражения [5, 6]:

$$\mathbf{B} = \mathbf{M}_{\Theta} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (1)$$

где $\mathbf{M}_{\Theta} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1}$ – матрица действия ТО; $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -1 + \frac{\Delta^2}{2} & 0 & \mp \Delta \\ 0 & -1 & 0 \\ \pm \Delta & 0 & -1 + \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix}$ – матрица

действия ТО при отсутствии измеряемого угла поворота; $\Delta = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \delta \cdot n$ – угол отклонения

отраженного пучка от оптической оси угломера; $\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} 1 & -\Theta_3 & \Theta_2 \\ \Theta_3 & 1 & -\Theta_1 \\ -\Theta_2 & \Theta_1 & 1 \end{bmatrix}$; \mathbf{M}_r^{-1} – матрицы

прямого и обратного преобразований координат, описывающих поворот ТО из исходного в текущее положение и выраженных через измеряемые параметры угловой ориентации Θ_1 , Θ_2 ,

Θ_3 ; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$ – орт падающего пучка.

Орт \mathbf{A}' отраженного пучка от фронтальной грани ТО (коллимационные углы) определяется по выражению, аналогичному выражению (1):

$$\mathbf{A}' = \mathbf{M}'_{\Theta} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M}_{zp} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (2)$$

где $\mathbf{M}'_{\Theta} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M}_{zp} \cdot \mathbf{M}_r^{-1}$ – матрица действия передней грани ТО; $\mathbf{M}_{zp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ – матрица

действия передней грани ТО при отсутствии измеряемого угла поворота.

В соответствии с выражениями (1) и (2), орты \mathbf{B} и \mathbf{A}' отраженного пучка с учетом величин второго порядка малости равны

$$\mathbf{B}_{1,2} = \begin{bmatrix} \pm \Delta \mp \frac{\Delta \cdot \Theta_1^2}{2} \pm \frac{\Delta \cdot \Theta_2^2}{2} \mp \Delta \cdot \Theta_3^2 \\ \pm \Delta \cdot \Theta_3 + \frac{\Delta^2 \cdot \Theta_1}{2} \\ 1 - \frac{\Delta^2}{2} + \Theta_2^2 - \Theta_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 2 \cdot \Theta_2 \\ -2 \cdot \Theta_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_{x'} \\ A'_{y'} \\ A'_{z'} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Величина составляющей орта B_y пропорциональна смещению y изображения марки (рис. 1):

$$y = B_y \cdot f', \quad (5)$$

где f' – фокусное расстояние приемного объектива автоколлиматора.

Тогда из выражения (3) следует, что рассматриваемый отражатель с некоторой погрешностью реализует независимое измерения угла скручивания Θ_3 в соответствии с алгоритмом:

$$\Theta_3 = \pm \frac{B_y}{\Delta} = \pm \frac{y}{\Delta \cdot f'} . \quad (6)$$

Из выражения (4) по величинам составляющих орта $A'_{x'}$ и $A'_{y'}$, пропорциональным смещениям x' и y' изображения марки, рассматриваемый отражатель реализует независимые измерения коллимационных углов Θ_1 и Θ_2 в соответствии с алгоритмом:

$$\Theta_1 = \frac{A'_{y'}}{-2} = -\frac{y'}{2 \cdot f'}, \quad \Theta_2 = \frac{A'_{x'}}{2} = \frac{x'}{2 \cdot f'}, \quad (7)$$

где f' – фокусное расстояние приемного объектива автоколлиматора.

Для повышения чувствительности Δ при использовании типового автоколлиматора с малым угловым полем предлагается использовать схему с переотражением пучка, реализуемым дополнительным плоским зеркалом 3 (рис. 2а).

В результате отраженный ТО 2 пучок минует приемный объектив и после отражения от зеркала направляется вновь на ТО. После повторного отражения от ТО (рис. 2а) формируется изображение марки (рис. 2б, поз. 4) на анализаторе, расположенном в фокальной плоскости объектива автоколлиматора.

Величина выноса дополнительного плоского зеркала составляет (рис. 2а):

$H = L \cdot \operatorname{tg} \Delta$, (8) где L – расстояние между оптической осью автоколлиматора и центром плоского зеркала; Δ – угол между нормалью к плоскому зеркалу и оптической осью автоколлиматора.

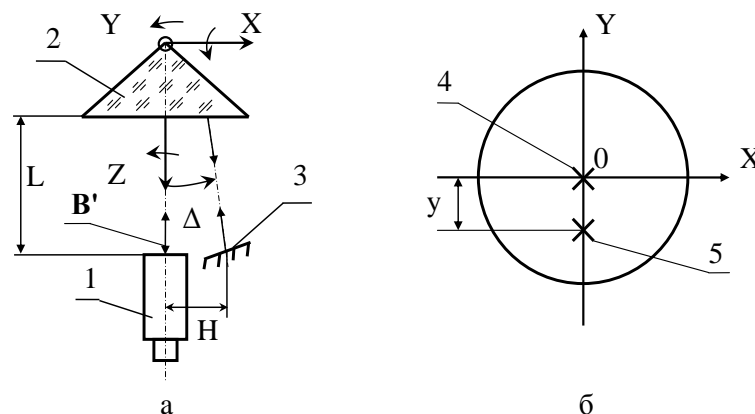


Рис. 2. а – схема системы с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания; б – изображение марки на матрице: 1 – автоколлиматор; 2 – тетраэдрический отражатель (ТО); 3 – плоское зеркало; 4 – изображение марки при $\Theta_3=0$; 5 – изображение марки при $\Theta_3 \neq 0$

Поворот объекта, с которым связан ТО, на малые углы Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 вокруг осей OX , OY , OZ приводит к смещению изображения марки (рис. 2б, поз. 4) на величину $-y$, пропорциональную углу скручивания, относительно центра анализатора (рис. 2б, поз. 5). Для данной схемы орт \mathbf{B}' (рис. 2а) отраженного пучка с учетом выражения (1) находится по формуле:

$$\mathbf{B}' = \mathbf{M}_\Theta \cdot \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_\Theta \cdot \mathbf{A} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (9)$$

где $\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cdot \Delta^2 & 0 & -2 \cdot \Delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -2 \cdot \Delta & 0 & -1 + 2 \cdot \Delta^2 \end{bmatrix}$ – матрица действия плоского зеркала [7].

Падающий на ТО параллельный пучок расщепляется на два пучка – коллимационный и по скручиванию. Тогда на анализаторе системы, чувствительная площадка которого

расположена в фокальной плоскости объектива, формируются два изображения марки (рис. 3, поз. 1, 2).

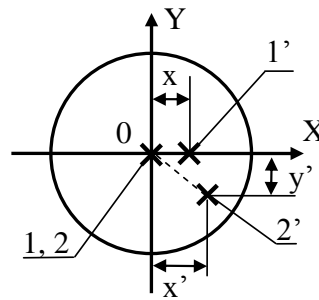


Рис.3. Положения изображения марки в плоскости анализатора при измерении угловых перемещений

При повороте уголкового отражателя на углы Θ_1 и Θ_2 (коллимационные углы) изображение (рис. 3, поз. 2) смещается относительно центра поля зрения, причем величина смещения относительно оси OX – y' пропорциональна углу Θ_1 , а относительно OY – x' – углу Θ_2 . А изображение (рис. 3, поз. 1) смещается на величину x пропорционально повороту отражающего КЭ на угол скручивания Θ_3 . При этом ребро двугранного угла ТО автоколлиматора равно 90° , расположено в плоскости ZOY . Такое положение ребра КЭ автоколлиматора, а следовательно, и соответствующее ему положение переотражающего плоского зеркала выбрано исходя из требований к массово-габаритным параметрам системы.

Тогда орт \mathbf{V}' отраженного пучка в реализованной схеме системы с учетом величин второго порядка малости в соответствии с выражением (9) равен

$$\mathbf{V}' = \begin{bmatrix} 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_3 + \Delta^2 \cdot \Theta_1 \\ \Delta \cdot \Theta_1^2 + \Delta \cdot \Theta_3^2 \\ 1 + 2 \cdot \Theta_2^2 - 2 \cdot \Theta_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Алгоритм измерения угла скручивания примет следующий вид:

$$\Theta_3 = \frac{B_x}{2 \cdot \Delta} = -\frac{x}{2 \cdot \Delta \cdot f'}, \quad (11)$$

где f' – фокусное расстояние приемного объектива автоколлиматора; $x = p_x \cdot x_{МФП}$; p_x – горизонтальный размер фоточувствительной площадки одного элемента матричного анализатора (МФП) с включенной зоной нечувствительности, расположенной слева (справа) от элемента (шаг элемента по горизонтали) (рис. 4); $x_{МФП}$ – координата изображения марки по углу скручивания на анализаторе.

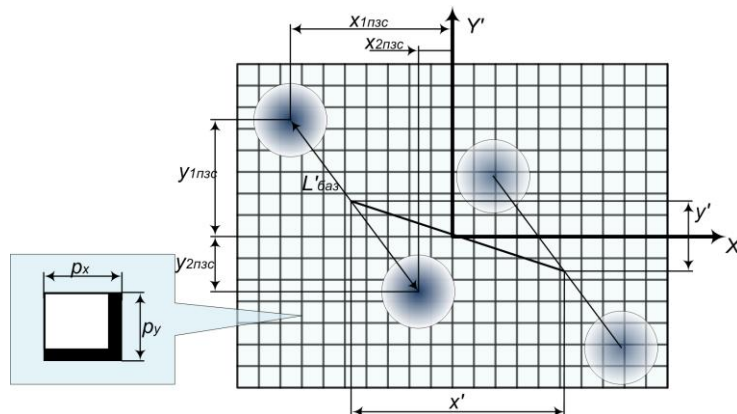


Рис.4. К расчету смещения марки на матричной фоточувствительной площадке

Алгоритм измерения коллимационных углов задается выражением (7), где $x' = p_x \cdot x'_{МФП}$ и $y' = p_y \cdot y'_{МФП}$, а p_x и p_y – соответственно горизонтальный и вертикальный размеры фоточувствительной площадки одного элемента анализатора с включенной зоной нечувствительности, расположенной слева (справа) и снизу (сверху) от элемента (шаг элемента по горизонтали и вертикали) (рис. 4); $x'_{МФП}, y'_{МФП}$ – координаты изображения марки по коллимационным углам на анализаторе.

В результате обработки видеокadra по алгоритмам (7), (11) определяются угловые перемещения контролируемого объекта по смещениям изображений марки на чувствительной площадке матричного анализатора, которые с точностью до постоянного коэффициента (равного фокусному расстоянию объектива автоколлиматора) равны координатам ортов отраженных пучков.

Методы исследования. Модель статической характеристики системы

Экспериментальные исследования параметров системы включают разработку методики их проведения и сами исследования с оценкой основных метрологических характеристик (погрешность измерения, диапазон измерения, дистанция измерения).

Для обеспечения достоверности результатов и единства измерений целесообразно исследовать систему по единой методике, в основу которой положена передача размера единицы плоского угла от эталона или образцового средства измерений угла к объекту исследования [8, 9, 10].

В качестве основной метрологической характеристики объекта исследования выбрана его статическая характеристика, под которой понимаем зависимость информативного параметра выходного сигнала углоизмерительной системы $y_{вых}$ от измеряемого углового рассогласования Θ :

$$y_{вых} = f(\Theta), \quad (12)$$

где $y_{вых}$ – смещение изображения визирной цели по площадке одного из матричных фотоприемников макета системы в пикселях; Θ – поворот визирной цели в радианах.

Исследование автоколлимационной системы также базируется на определении орта отраженного пучка В (рис. 1) по найденным матрицам действия ТО, плоского зеркала с учетом поворота исследуемого объекта, с которым связан ТО, на координатные углы $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ относительно осей ОХ, ОУ, ОZ [5, 6].

Таким образом, экспериментальные исследования нацелены на получение статической характеристики системы. В соответствии с разрабатываемой методикой в экспериментах будет определяться группа статических характеристик объекта исследования, которую можно рассматривать как семейство отдельных реализаций случайной функции угла рассогласования, а также как эмпирическую кривую регрессии, являющуюся точечной оценкой искомой модели объекта исследования [11, 12].

Тогда погрешность $\Delta\Theta$ измерения угла Θ будет определяться доверительной областью статической характеристики, образованной верхней и нижней границами доверительных интервалов для среднего значения информативного параметра $y_{вых}$ выходного сигнала при различных углах рассогласования.

Методика проведения экспериментальных исследований системы

В основу разработанной методики положена передача размера единицы плоского угла от эталона или образцового средства измерений угла к объекту исследования [9, 10]. При этом

будет определяться группа статических характеристик объекта исследования, которую можно рассматривать как семейство отдельных реализаций случайной функции угла рассогласования.

Измерения должны выполняться на установке стенда на дистанции 1 000 мм. Повороты ТО вокруг координатных осей задаются поворотным столиком для углов скручивания в диапазоне $\pm 25^\circ$ и коллимационных углов в диапазоне $\pm 10^\circ$. Измерения проводятся по представленной ниже методике для каждого из углов поворота ТО.

Основные этапы экспериментальных исследований:

- включение и подготовка к работе элементов стенда;
- получение изображения на экране и последующая его обработка в среде LabVIEW :
 - а) получить в области вывода видеосигнала два изображения марки полупроводникового излучающего диода (ПВД). Одно из них используется для измерения коллимационного угла, другое – для угла скручивания;
 - б) выставить нулевое положение КЭ по углам на поворотном столике, связанным с ТО;
 - в) снять серию измерений (всего их – 10, начальное значение – 0 мин., шаг – 1 мин.);
 - г) сохранить результаты измерений;
 - д) установить ТО в следующее угловое положение;
 - е) повторить пункты а–д для всего диапазона измерений;
 - ж) после проведения всех серий измерений установить положение поворотного столика в нулевое значение;
 - завершение работы с элементами стенда;
 - определение статической характеристики оптико-электронного автоколлиматора (обработка данных проводится в среде Mathcad):

а) проведение N серий измерений по 10 отсчетов в каждом. В результате чего накапливался массив значений координат X и Y энергетического центра изображения ПВД автоколлиматора. Результаты занести в Табл. 1;

б) показания по координате Y занести в таблицу, имеющую аналогичный вид.

в) для каждой серии измерений найти математическое ожидание (средние значения) \bar{X} и \bar{Y} измеренных координат по формулам:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad (13)$$

где n – число отсчетов в каждой серии измерений; $n=10$; X_i, Y_i – измеренные координаты изображения в серии. Результаты расчетов занести в Табл. 2, где значения поворота КЭ записаны в радианах.

Таблица 1

Показания по координате X

№ серии	Поворот КЭ Θ, мин	Координата X, пиксели									
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
1	0										
...	...										
N											

Таблица 2

Результаты расчетов по координате X

№ серии	Поворот КЭ, Θ рад	Значения расчетов по координате X				
		\bar{X}	$\bar{\theta}_x$, рад	θ_x , рад	$\Delta_{\theta x}$, рад	σ_x , рад
1	...					
...	...					
N	...					

Результаты расчетов по координате Y занести в аналогичную таблицу;

г) пересчитать линейное перемещение изображения на приемнике, выраженное математическим ожиданием координат энергетического центра, в угловое отклонение отраженного КЭ пучка в радианах по формулам:

$$\bar{\theta}_x = \arctg\left(\frac{\bar{X} \cdot p}{f}\right), \quad \bar{\theta}_y = \arctg\left(\frac{\bar{Y} \cdot p}{f}\right), \quad (14) \text{ где } p - \text{ размер пикселя приемника}$$

автоколлиматора; f – фокусное расстояние объектива. Результаты расчетов занести в Табл. 2;

д) найти параметры статической характеристики автоколлиматора K_Θ и a_0 , где K_Θ – коэффициент преобразования, который определяется как тангенс угла наклона случайной функции $\bar{\theta}(\Theta)$ (Табл. 2); a_0 – значения случайной функции $\bar{\theta}(\Theta)$ при $\Theta = 0$;

е) найти значения статической характеристики автоколлиматора (Табл. 2):

$$\theta(\Theta) = K_\Theta \cdot \Theta + a_0; \quad (15)$$

ж) найти распределение погрешности измеренного угла поворота:

$$\Delta_\Theta = \bar{\theta}(\Theta) - \theta(\Theta); \quad (16)$$

з) определить среднеквадратическое значение погрешности измеренного угла поворота (Табл. 2):

$$\sigma_x = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta_{\Theta xj} - \bar{\Delta}_{\Theta x})^2}}{\sqrt{2N-1}}, \quad \sigma_y = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta_{\Theta yj} - \bar{\Delta}_{\Theta y})^2}}{\sqrt{2N-1}}, \quad (17)$$

где N – число серий измерений; $\Delta_{\Theta xj}$ и $\Delta_{\Theta yj}$ – j -я реализация погрешностей (Табл. 2); $j = 1, \dots, N$; $\bar{\Delta}_{\Theta x}$, $\bar{\Delta}_{\Theta y}$ – среднее значение погрешности в радианах

$$\bar{\Delta}_{\Theta x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta_{\Theta xj}, \quad \bar{\Delta}_{\Theta y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta_{\Theta yj}; \quad (18)$$

и) пересчитать среднеквадратическое значение погрешности в угловые секунды;

к) построить график статической характеристики автоколлиматора по измеренному углу $\theta(\Theta)$, показать на нем распределение случайной функции $\bar{\theta}(\Theta)$; значения величин θ , $\bar{\theta}$, Θ в радианах (Табл. 2);

л) в соответствии с алгоритмами измерений (7), (11) для коллимационных углов и угла скручивания построить распределение случайной функции $\bar{X}(\Theta)$, где средняя величина измеренной координаты \bar{X} в пикселях (Табл. 2), а задаваемый угол поворота Θ в минутах (Табл. 1);

м) найти параметры приборной статической характеристики автоколлиматора $K_{\Theta n}$ и a_{0n} , где $K_{\Theta n}$ – коэффициент преобразования, который определяется как тангенс угла наклона случайной функции $\bar{X}(\Theta)$ (Табл. 2); a_{0n} – значения случайной функции $\bar{X}(\Theta)$ при $\Theta = 0$; задаваемый угол поворота Θ в минутах (Табл. 1);

н) найти значения и построить график приборной статической характеристики автоколлиматора

$x(\Theta) = K_{\Theta n} \cdot \Theta + a_{0n}$, (19) где значения приборной статической характеристики x в пикселях, задаваемый угол поворота Θ в минутах (Табл. 1);

о) найти и построить распределение погрешности измеренного угла поворота:

$\Delta_{\Theta n} = \bar{X}(\Theta) - x(\Theta)$, (20) где значения погрешности $\Delta_{\Theta n}$ в пикселях, а задаваемый угол поворота Θ в минутах (Табл. 1).

Экспериментальные исследования системы в лабораторных условиях

Целью данного исследования является:

- проверка возможности измерения углов скручивания в диапазоне $\pm 25'$ и коллимационных углов в диапазоне $\pm 10'$ для дистанции в 1 м на разработанном стенде,
- снятие статической характеристики системы;
- определение погрешности измерения углов и коэффициента передачи ТО по измеренным углам.

Описание лабораторного стенда

В лаборатории изготовлен макет трехкоординатной автоколлимационной системы контроля угловых деформаций промышленных объектов и собран стенд для проведения исследований системы (рис. 5).

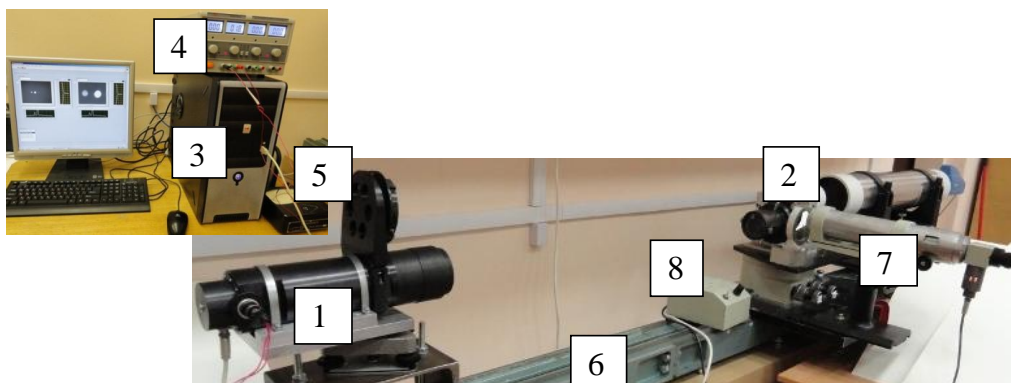


Рис. 5. Стенд для испытания трехкоординатной автоколлимационной системы контроля угловых деформаций промышленных объектов: 1 – автоколлиматор; 2 – КЭ в виде тетраэдрического отражателя, установленный на поворотный столик, который позволяет задавать повороты относительно коллимационных осей OX , OY на углы Θ_1 , Θ_2 и оси скручивания OZ на угол Θ_3 ; 3 – персональный компьютер (ПК); 4 – блок питания источника излучения автоколлиматора; 5 – миллиамперметр; 6 – оптическая скамья ОСК-2; 7 – визуальный автоколлиматор АКТ-15 с отражателем в виде плоского зеркала для контроля углового положения ПС; 8 – блок питания источника излучения автоколлиматора АКТ-15

Принцип работы исследуемой системы основан на автоколлимации пучка лучей. Излучение от ПИД, размещенного в фокальной плоскости объектива, распространяется до

объекта, где отражается в ТО для измерения угла скручивания. После переотражения плоским зеркалом объектив формирует изображения ПИД на матричном фотоприемнике. При этом регистрируемое смещение изображения пропорционально угловому повороту. Для измерения коллимационных углов используется изображение ПИД, полученное отражением от передней грани ТО. Далее на фотоприемнике происходит преобразование световых сигналов в электрические, которые поступают в ПК, где происходит программная обработка данных.

Описание программы обработки данных

Для получения изображения на экране и последующей его обработке использовалась программа, разработанная в среде LabVIEW. Для этого были найдены координаты центра изображения по положению максимального элемента. Далее происходило снятие серии отсчетов и вычисление координат максимального элемента для каждого кадра изображения. Вычисленные значения записывались в таблицу измеренных значений с последующим ее сохранением.

Программа обработки, выполненная в среде LabVIEW, содержит два окна: лицевой панели и панели диаграмм. Лицевая панель включает строку меню, панель инструментов, окна справки, настройки (рис. 6), измерений (рис. 7), описания (рис. 8) и кнопку завершения работы программы управления «Stop».

Настройка программы сводится к выбору источника цифрового видеосигнала и основных его параметров (рис. 6), таких как разрешение передаваемого изображения и режима снятия информации. Окно настройки также содержит область вывода видеосигнала и графики распределения облученности изображения марки ПИД в выделенной области вывода видеосигнала.

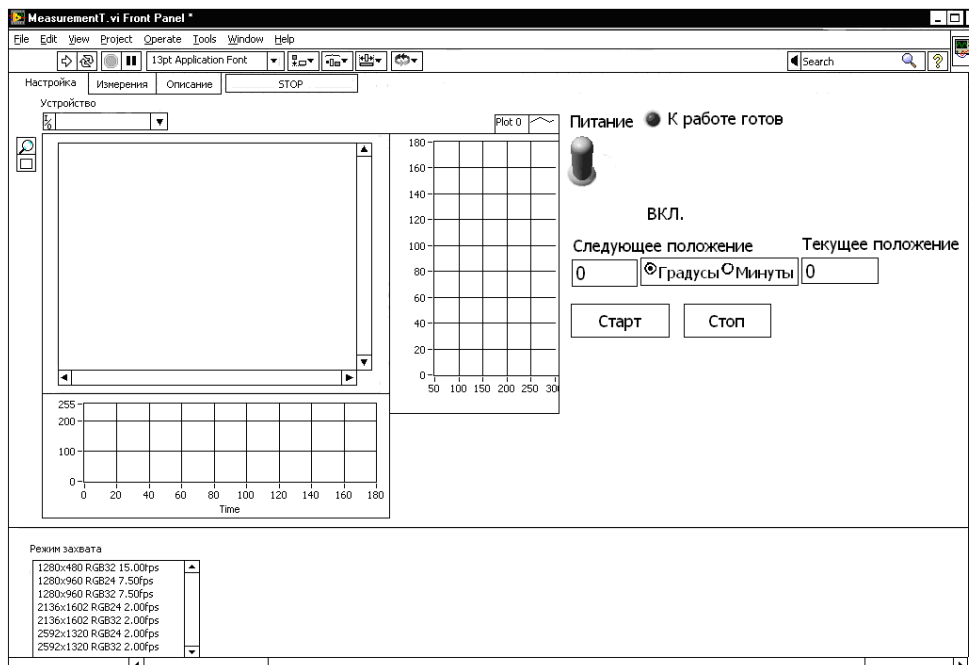


Рис. 6. Окно настройки лицевой панели

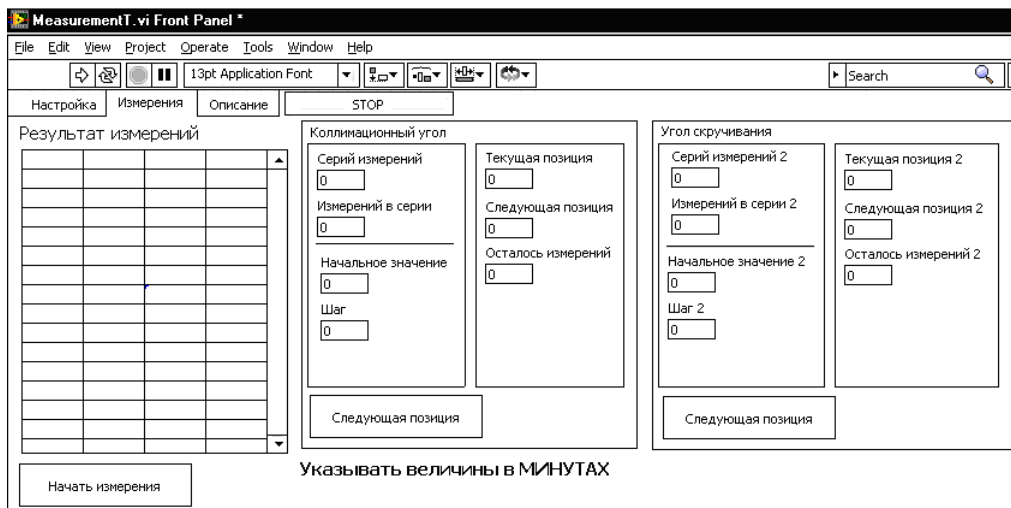


Рис. 7. Окно измерений лицевой панели для случая угловых перемещений

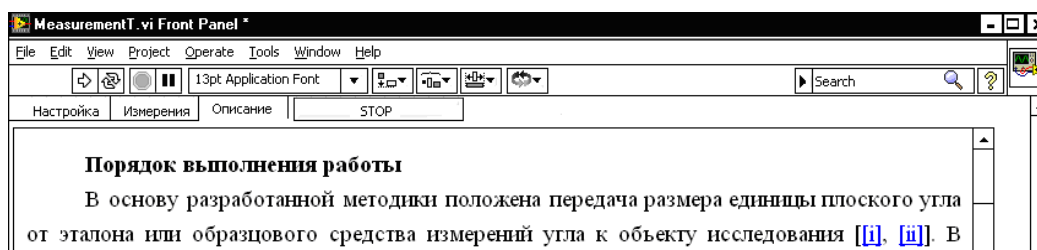


Рис. 8. Окно описания лицевой панели

Окно измерений для угловых перемещений (рис. 7) содержит области ввода значений количества измерений и углового положения КЭ в полях для коллимационных углов и угла скручивания: «серий измерений», «измерений в серии», «начальное значение» в минутах, «шаг» в минутах. Поля «текущая позиция», «следующее позиция», «осталось измерений» заполняются программно и служат для индикации этапа измерений. Результаты измерений выводятся на экран в виде таблицы «Результат измерений». Для сохранения результатов измерений в формате txt имеется кнопка «Сохранить результат». Установка КЭ в следующее угловое положение осуществляется в ручном режиме, при котором кнопка «Следующая позиция» используется для индикации установленного углового положения КЭ.

В окне описания (рис. 8) представлено краткое изложение порядка выполнения измерений на стенде.

Все средства управления и индикации лицевой панели связаны с алгоритмом работы программы, отображаемым на панели диаграмм: модули видеозахвата, предварительной обработки, обработки изображения, записи в таблицу измеренных значений, сохранения измеренных значений, сброса установок в исходное положение.

Измерение угла скручивания

Для получения изображения на экране использовалась программа, разработанная в среде LabVIEW. На экране ПК в области вывода видеосигнала получали два изображения марки ПИД (рис. 9). Для измерений угла скручивания использовали изображение с большей величиной облученности.

Для определения статической характеристики системы по углу скручивания измерялись координаты энергетического центра изображения, определяемые количеством элементов

матрицы. Для этого были найдены координаты центра изображения по положению максимального элемента.

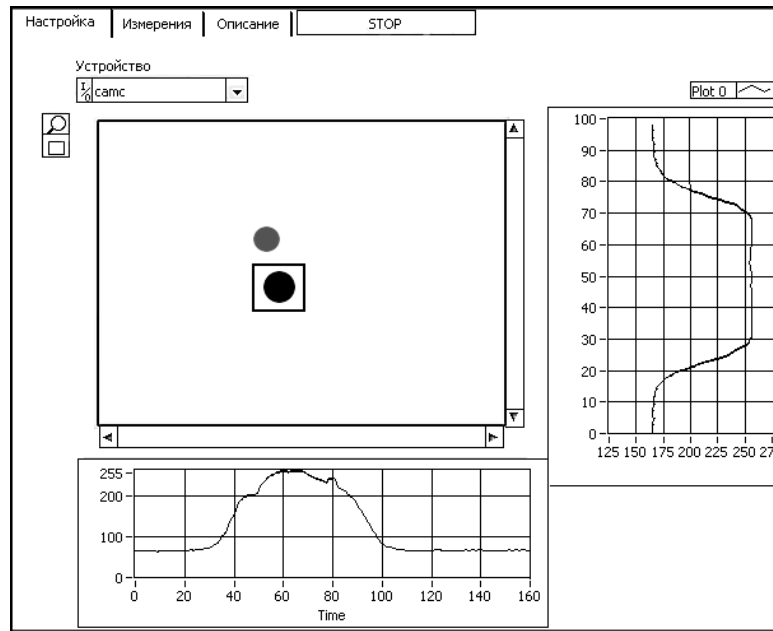


Рис. 9. Изображение поля зрения (инверсное)

Далее происходило снятие серии отсчетов и вычисление координат максимального элемента для каждого кадра изображения. В ходе измерений накапливался массив значений координат X и Y. Измеренные значения записывались в таблицы. Результаты обработки экспериментальных данных для угла скручивания представлены в Табл. 3.

Таблица 3

Результаты обработки экспериментальных данных

№ сер.	Поворот КЭ на Θ_3 , рад	\bar{X} , пикс	$\bar{\Theta}_3$, рад	θ_3 , рад	$\Delta\theta_3$, рад	σ_{θ_3} , рад
1	$-7.2722 \cdot 10^{-3}$	393.2154	$9.0392 \cdot 10^{-3}$	$9.0497 \cdot 10^{-3}$	$-1.0552 \cdot 10^{-5}$	$1.072 \cdot 10^{-5}$
2	$-5.8178 \cdot 10^{-3}$	407.0319	$9.3568 \cdot 10^{-3}$	$9.3563 \cdot 10^{-3}$	$4.6565 \cdot 10^{-7}$	
3	$-4.3633 \cdot 10^{-3}$	420.5879	$9.6684 \cdot 10^{-3}$	$9.6629 \cdot 10^{-3}$	$5.4939 \cdot 10^{-6}$	
4	$-2.9089 \cdot 10^{-3}$	434.0763	$9.9784 \cdot 10^{-3}$	$9.9695 \cdot 10^{-3}$	$8.9641 \cdot 10^{-6}$	
5	$-1.4544 \cdot 10^{-3}$	447.8631	0.0103	0.0103	$1.9292 \cdot 10^{-5}$	
6	0	460.0836	0.0106	0.0106	$-6.3836 \cdot 10^{-6}$	
7	$1.4544 \cdot 10^{-3}$	473.1564	0.0109	0.0109	$-1.2471 \cdot 10^{-5}$	
8	$2.9089 \cdot 10^{-3}$	486.2554	0.0112	0.0112	$-1.7959 \cdot 10^{-5}$	
9	$4.3633 \cdot 10^{-3}$	500.7667	0.0115	0.0115	$9.0145 \cdot 10^{-6}$	
10	$5.8178 \cdot 10^{-3}$	513.5610	0.0118	0.0118	$-3.48 \cdot 10^{-6}$	
11	$7.2722 \cdot 10^{-3}$	527.3817	0.0121	0.0121	$7.6143 \cdot 10^{-6}$	

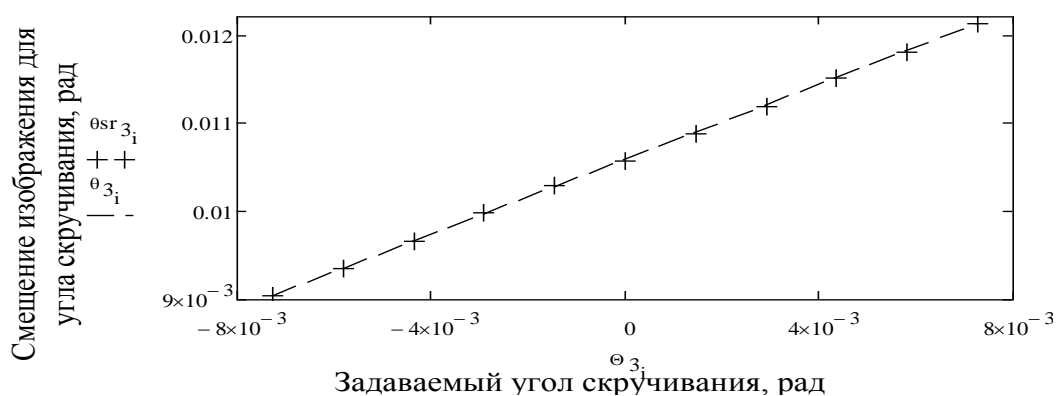
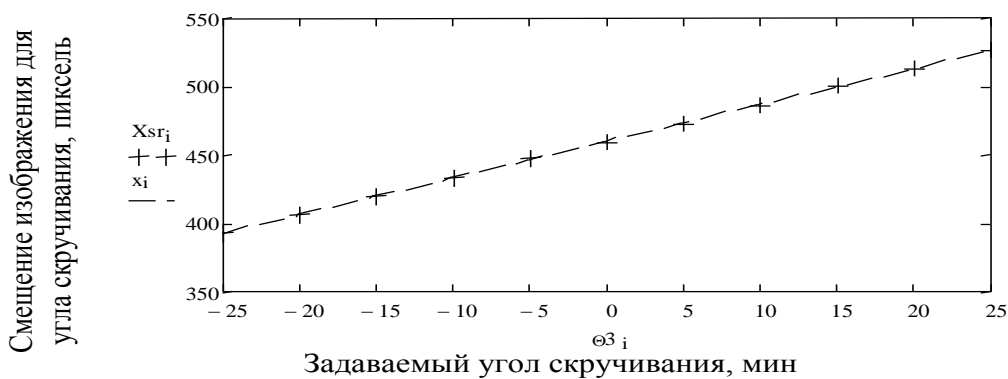
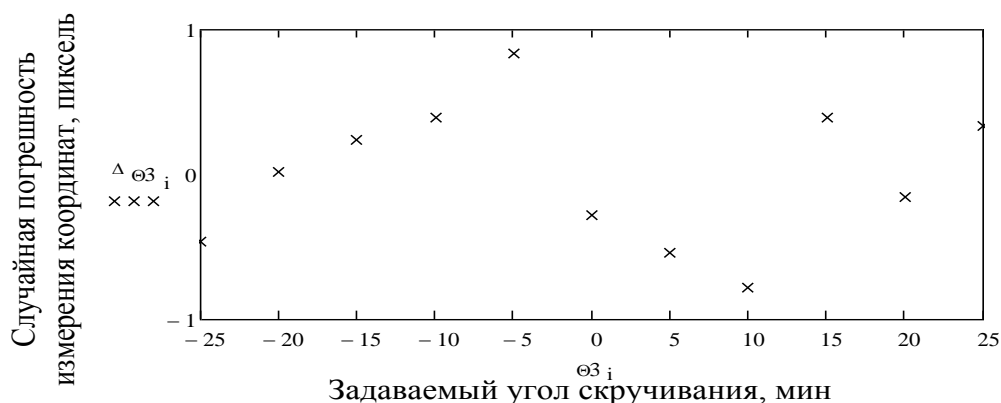
Полученные значения коэффициента передачи и среднеквадратическое значение погрешности измерения угла скручивания представлены в Табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений

Параметр, единицы измерения	Значение
Диапазон измерений, угл. мин.	± 25
Значение теоретического коэффициента передачи КЭ по скручиванию $K_{\text{теор}}$	0,2
Значение экспериментального коэффициента передачи зеркала $K_{\Theta 3}$	0,211
Среднее квадратическое значение погрешности измеренного угла скручивания $\sigma_{\Theta 3}$, угл. сек.	2,2

Статические характеристики автоколлиматора и распределение случайной погрешности измерения координат по углу скручивания представлены на рис. 10, 11, 12, где $\theta_{sr3} = \bar{\theta}_3$, $X_{sr} = \bar{X}$.

Рис. 10. Статическая характеристика по углу скручивания Θ_3 Рис. 11. Статическая характеристика по углу скручивания Θ_3 Рис. 12. Случайная погрешность измерения координат по углу Θ_3

Приведенные результаты исследования позволяют сделать вывод об эффективности разработанной системы измерения углов скручивания при повороте объекта в диапазоне $\pm 25^\circ$. Среднеквадратическое значение погрешности измерения угла скручивания составляет $2,2''$.

Измерение коллимационных углов

Измерения коллимационных углов проводились по части пучка, отраженного от фронтальной грани ТО как от автоколлимационного зеркала. На экране в среде LabVIEW в области вывода видеосигнала получали два изображения марки ПИД (рис. 13). Измерения проводились по изображению марки ПИД с меньшей величиной облученности.

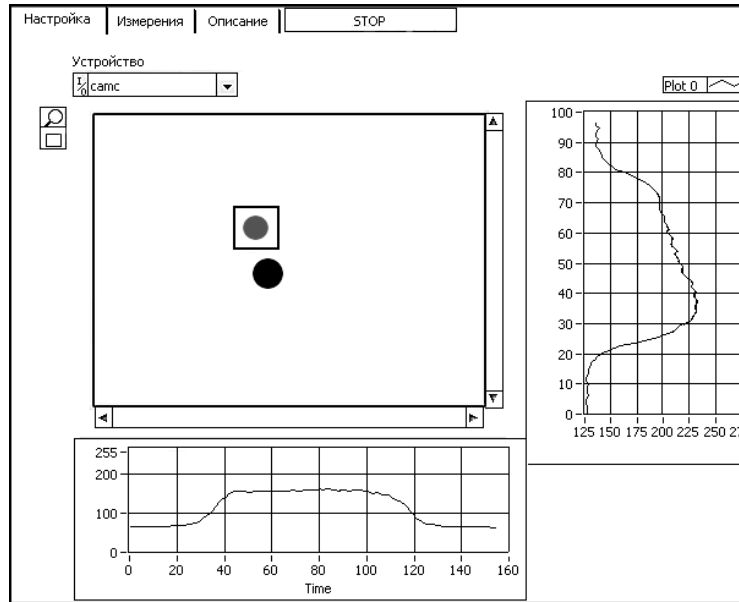


Рис. 13. Изображение поля зрения (инверсное)

Также измерялись координаты энергетического центра изображения в количестве элементов матрицы. Аналогично происходило снятие серии отсчетов и вычисление координат максимального элемента для каждого кадра изображения. В ходе измерений накапливался массив значений координат X и Y. Измеренные значения записывались в таблицы.

Результаты обработки экспериментальных данных представлены в Табл. 5 и 6.

Таблица 5

Результаты обработки экспериментальных данных

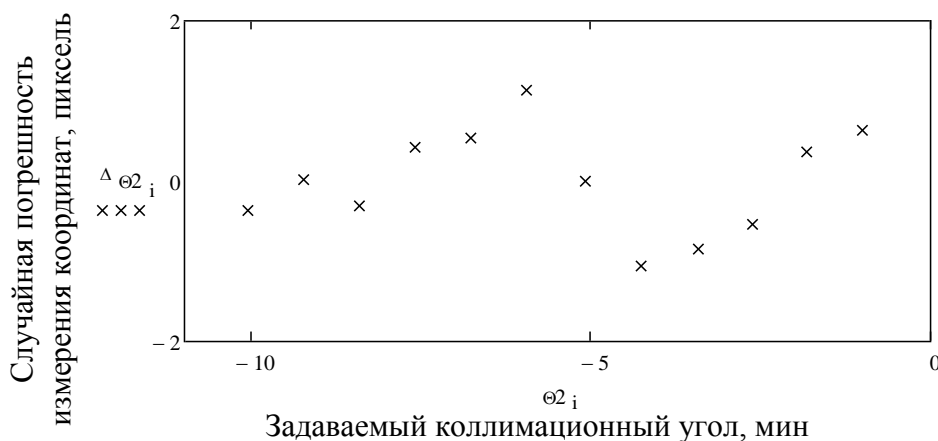
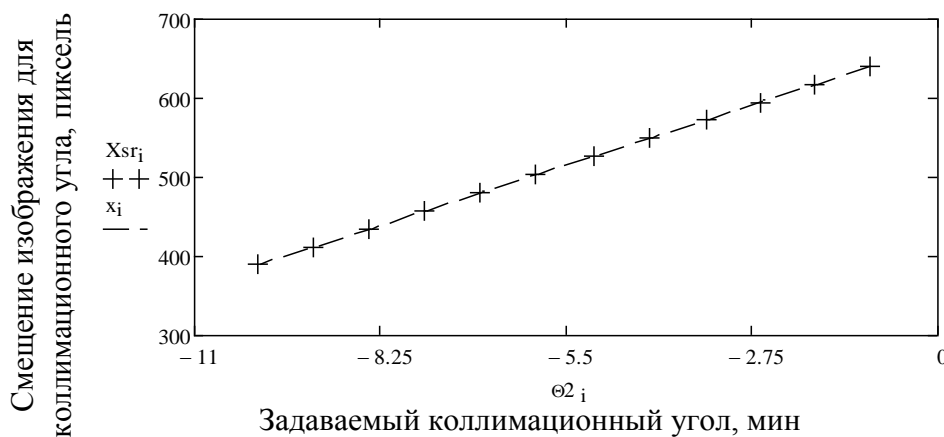
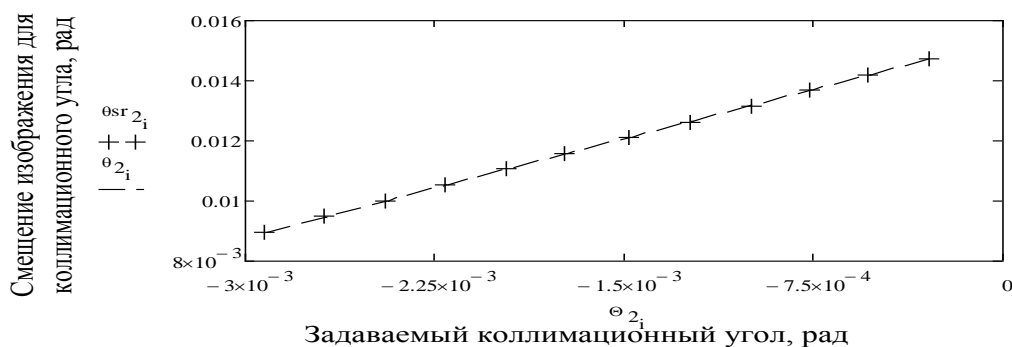
№ сер.	Поворот КЭ на Θ_2 , рад	\bar{X} , пикс	$\bar{\theta}_2$, рад	θ_2 , рад	$\Delta\theta_2$, рад	σ_{θ_2} , рад
1	$-2.9089 \cdot 10^{-4}$	641.1802	0.0147	0.0147	$1.4399 \cdot 10^{-5}$	$1.4225 \cdot 10^{-5}$
2	$-5.333 \cdot 10^{-4}$	617.8767	0.0142	0.0141	$8.4706 \cdot 10^{-6}$	
3	$-7.6601 \cdot 10^{-4}$	594.8518	0.0137	0.0136	$-1.2251 \cdot 10^{-5}$	
4	$-9.9872 \cdot 10^{-4}$	572.4149	0.0132	0.0131	$-1.9464 \cdot 10^{-5}$	
5	$-1.2411 \cdot 10^{-3}$	549.1680	0.0126	0.0126	$-2.4114 \cdot 10^{-5}$	
6	$-1.4835 \cdot 10^{-3}$	527.1784	0.0121	0.0121	$1.2524 \cdot 10^{-7}$	
7	$-1.7356 \cdot 10^{-3}$	504.3366	0.0116	0.0115	$2.5959 \cdot 10^{-5}$	
8	$-1.9683 \cdot 10^{-3}$	481.6173	0.0111	0.0110	$1.2227 \cdot 10^{-5}$	
9	$-2.2108 \cdot 10^{-3}$	458.4641	0.0105	0.0105	$9.7045 \cdot 10^{-6}$	
10	$-2.4483 \cdot 10^{-3}$	435.1439	0.01	0.01	$-7.2590 \cdot 10^{-6}$	
11	$-2.6907 \cdot 10^{-3}$	412.4371	$9.481 \cdot 10^{-3}$	$9.4805 \cdot 10^{-3}$	$4.6706 \cdot 10^{-7}$	
12	$-2.9283 \cdot 10^{-3}$	389.4754	$8.9532 \cdot 10^{-3}$	$8.9614 \cdot 10^{-3}$	$-8.2647 \cdot 10^{-6}$	

Таблица 6

Результаты измерений и расчетов

Параметр, единицы измерения	Значение
Диапазон измерений, угл. мин.	10
Значение теоретического коэффициента передачи зеркала $K_{\text{теор}}$	2
Значение экспериментального коэффициента передачи зеркала K_{Θ_2}	2,125
Среднее квадратическое значение погрешности измеренного коллимационного угла σ_{Θ_2} , угл. сек.	3

Построены графики статической характеристики автоколлиматора (рис. 14, 15) и распределения случайной погрешности измерения координат по углу Θ_2 (рис. 16), где $\theta_{sr_2} = \bar{\Theta}_2$; $X_{sr} = \bar{X}$.



Аналогичные измерения были проведены по измерению коллимационного угла Θ_1 . Были получены те же значения погрешностей и коэффициента преобразования ТО.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод об эффективности исследуемой системы, предназначенной для измерения коллимационных углов поворота объекта в диапазоне до $10'$. Среднеквадратическое значение погрешности измерения при этом составляет $3''$.

Определение суммарной погрешности измерения трех углов

Считая все рассмотренные величины статистически независимыми, можно записать, что суммарная относительная погрешность измерения равна:

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\Theta_3})^2 + 2 \cdot (\sigma_{\Theta_{кол}})^2}, \quad (021)$$

где под σ подразумевается относительная погрешность для каждого из измеряемых углов.

Тогда $\sigma = 0,007$ (0,7%).

Заключение

В процессе реализации проекта использованы следующие методы исследований:

- аналитический;
- математический анализ в среде Mathcad;
- экспериментальные исследования с помощью стенда;
- обработка данных в среде LabVIEW и Mathcad.

Исследуемая оптико-электронная система обеспечивает:

- измерение параметров углового пространственного положения объектов с помощью КЭ в виде тетраэдрического отражателя с коэффициентами передачи $K=2$ и $K=0,2$;
- измерение трех угловых координат контролируемого объекта и угла скручивания с увеличенной чувствительностью.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность рассматриваемого макета системы. Он позволяет проводить независимые измерения угла скручивания в диапазоне $\pm 25'$ с погрешностью $2,2''$, а также измерения коллимационных углов в диапазоне до $10'$ с погрешностью $3''$.

Практическое использование результатов проводимых исследований в области приборостроения:

- контроль точности сопряжения и взаимного расположения частей и блоков в процессе монтажа и при работе оборудования в строительстве, энергетике, промышленных производствах, машиностроении и приборостроении;
- оперативный контроль деформаций и прогибов нагруженных элементов промышленных сооружений и энергетических установок;
- измерение угловых деформаций оснований, опорных плит, несущих элементов и направляющих крупногабаритных производственных установок для уменьшения погрешностей их функционирования;
- измерения угловых деформаций образцов и моделей при испытаниях новых материалов и изделий при выполнении производственных операций по обработке крупногабаритных деталей.

Публикации

1. Коняхин И.А., Копылова Т.В., Коняхин А.И., Меерсон А.Д. Определение условий соблюдения инвариантности измерения угла скручивания в оптико-электронных автоколлимационных системах // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 3 (67). С. 129.
2. Михеев С.В., Араканцев К.Г., Копылова Т.В. Оптико-электронные системы контроля конструкций крупных промышленных сооружений по положению их элементов // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 4 (68). С. 119.
3. Коняхин И.А., Копылова Т.В. Трехкоординатный оптико-электронный угломер со специальным построением канала измерения угла скручивания // 9 Международная конференция «Прикладная оптика — 2010» (ГОИ им. С.И. Вавилова, 18–22 октября 2010): Сб. трудов. Т. 1. Ч. 2. СПб., 2010. С. 146–149.
4. Коняхин И.А., Копылова Т.В. Трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 6 (70). С. 9–11.
5. Коняхин И.А., Копылова Т.В. Оптико-электронная автоколлимационная система инвариантного измерения угла скручивания // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5 (75). С. 11–13.
6. Konyakhin I.A., Kopylova T.V., Konyakhin A.I. Optic-electronic autocollimation sensor for measurement of the three-axis angular deformation of industry objects // Proceedings of SPIE 8439. 84391N (April 23, 2012): <http://dx.doi.org/10.1117/12.922096>.
7. Копылова Т.В. Трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров НИУ ИТМО. СПб., 2011. С. 18–20.
8. Копылова Т.В. Исследование биаксиальной схемы оптико-электронного канала измерения угла скручивания // XLI научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО (31 января – 3 февраля 2012 года): Актуальные теоретические и практические вопросы современного оптико-электронного приборостроения. Сб. трудов молодых ученых. СПб., 2012. С. 90–93.
9. Копылова Т.В. Трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью измерения скручивания // Сб. тезисов докладов конференции молодых ученых. Вып. 2. Труды молодых ученых. СПб., 2010. С. 97–98.
10. Копылова Т.В. Исследование автоколлимационной схемы инвариантного измерения угла скручивания // Сб. тезисов докладов конференции молодых ученых. Вып. 2. Труды молодых ученых. СПб., 2011. С. 109–110.
11. Копылова Т.В. Исследование свойств контрольных элементов для измерения угла скручивания с увеличенной чувствительностью // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. Труды молодых ученых. СПб., 2012. С. 78–80.
12. Коняхин И.А., Копылова Т.В., Усик А.А., Кулешова Е.Н. Измерение координат изображения радиисточника, смоделированного на матрице радиотелескопа. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012613940 от 27 апреля 2012 г. (заявка № 2012611952 подана 20 марта 2012 г.).

13. Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Копылова Т.В., Коняхин А.И., Серикова М.Г. Устройство для контроля поворота объекта. Заявка 2011126864, Российская Федерация: МПК G01B 11/26 (заявка проходит экспертизу, получено положительное решение).
14. Копылова Т.В., Коняхин И.А. Исследование автоколлимационной системы инвариантного измерения угла скручивания со специальным переотражающим элементом (статья подана в редакцию НИУ ИТМО для печати в альманахе научных работ молодых ученых НИУ ИТМО, сборник готовится к печати).
15. Коротаев В.В., Коняхин И.А., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка многопараметрических измерительных преобразователей, приборов и комплексов многофункционального приборостроения для промышленных систем управления. Отчет по НИР № 390134 (Государственный контракт № 02.740.11.0169 от 25 июня 2009 г.). Г.Р. № 01200959042. Этап 1 (Проведение исследований и разработка документации на макеты и экспериментальные образцы элементов многофункционального приборостроения). СПб., 2009. – 440 с.
16. Коняхин И.А., Копылова Т.В. и др. Отработка методов технической реализации средств контроля положения элементов зеркальной системы и опорно-поворотного устройства радиотелескопа РТ-70. Отчет по НИР № 29880. Г.Р. № 01200953012. СПб., 2009. – 149 с.
17. Коротаев В.В., Коняхин И.А., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка многопараметрических измерительных преобразователей, приборов и комплексов многофункционального приборостроения для промышленных систем управления. Отчет по НИР № 390134 (Государственный контракт № 02.740.11.0169 от 25 июня 2009 г.). Г.Р. № 01200959042. Этап 2 (Разработка системы адаптивного распознавания объектов производственных сцен и изготовление основных узлов экспериментальных образцов оптико-электронных преобразователей и макетов датчиков многофункционального приборостроения). СПб., 2010. – 307 с.
18. Коняхин И.А., Анисимов А.Г., Араканцев К.Г., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка универсальной оптико-электронной системы высокоточного позиционирования элементов составного зеркала с управляемой формой поверхности для радиотелескопов миллиметрового диапазона длин волн. Отчет по НИР № 300225 (Государственный контракт № П684 от 20 мая 2010 г.). Этап 1. СПб., 2010. – 108 с.
19. Коняхин И.А., Анисимов А.Г., Араканцев К.Г., Горбачев А.А., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка универсальной оптико-электронной системы высокоточного позиционирования элементов составного зеркала с управляемой формой поверхности для радиотелескопов миллиметрового диапазона длин волн. Отчет по НИР № 300225 (Государственный контракт № П684 от 20 мая 2010 г.). Этап 2. СПб., 2010. – 156 с.
20. Коротаев В.В., Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка многопараметрических измерительных преобразователей, приборов и комплексов многофункционального приборостроения для промышленных систем управления. Отчет по НИР № 390134 (Государственный контракт № 02.740.11.0169 от 25 июня 2009 г.). Г.Р. № 01200959042. Этап 3 (Разработка методики обучения интеллектуальных систем управления на основе визуальных данных, настройка экспериментальных образцов оптико-электронных преобразователей и программного обеспечения для системы калибровки элементов многофункционального приборостроения). СПб., 2010. – 310 с.
21. Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Арефьева Е.А., Араканцев К.Г., Жуков Д.В., Усик А.А., Копылова Т.В. и др. Эскизное проектирование оптико-электронных средств контроля

положения элементов зеркальной системы и опорно-поворотного устройства радиотелескопа РТ-70. Отчет по НИР № 21005. Г.Р. № 01201056743. СПб., 2010. – 256 с.

22. Коротаев В.В., Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка многопараметрических измерительных преобразователей, приборов и комплексов многофункционального приборостроения для промышленных систем управления. Отчет по НИР № 390134 (Государственный контракт № 02.740.11.0169 от 25 июня 2009 г.). Г.Р. № 01200959042. Этап 4 (Разработка способов аппаратной реализации промышленных систем адаптивного управления, исследование параметров экспериментальных образцов и калибровка параметров двухкоординатной прецизионной поворотной платформы). СПб., 2011. – 365 с.

23. Коротаев В.В., Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Горбачев А.А., Чертов А.Н., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка многопараметрических измерительных преобразователей, приборов и комплексов многофункционального приборостроения для промышленных систем управления. Отчет по НИР № 390134 (Государственный контракт № 02.740.11.0169 от 25 июня 2009 г.). Г.Р. № 01200959042. Этап 5 (Исследование параметров и характеристик и ввод экспериментальных образцов и макетов в учебный процесс). СПб., 2011. – 269 с.

24. Панков Э.Д., Копылова Т.В. и др. Исследование принципов инвариантности в распределенных оптико-электронных системах оптической локации и мониторинга технической среды. Отчет по НИР № 18006. Г.Р. № 0120.0 804817. Этап 4 (Исследование информационных искажений при инвариантных преобразованиях в композиционных анаморфотных оптико-электронных системах контроля пространственного положения и мониторинга технической среды). СПб., 2011. – 131 с.

25. Коняхин И.А., Горбачев А.А., Горбунова Е.В., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка универсальной оптико-электронной системы высокоточного позиционирования элементов составного зеркала с управляемой формой поверхности для радиотелескопов миллиметрового диапазона длин волн. Отчет по НИР № 300225 (Государственный контракт № П684 от 20 мая 2010 г. и Дополнению от 14 марта 2011 г. № 1). Этап 3. СПб., 2011. – 129 с.

26. Коняхин И.А., Горбачев А.А., Араканцев К.Г., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка универсальной оптико-электронной системы высокоточного позиционирования элементов составного зеркала с управляемой формой поверхности для радиотелескопов миллиметрового диапазона длин волн. Отчет по НИР № 300225 (Государственный контракт № П684 от 20 мая 2010 г. и Дополнению от 14 марта 2011 г. № 1). Этап 4. СПб., 2011. – 110 с.

27. Коняхин И.А., Горбачев А.А., Араканцев К.Г., Копылова Т.В. и др. Исследование и разработка универсальной оптико-электронной системы высокоточного позиционирования элементов составного зеркала с управляемой формой поверхности для радиотелескопов миллиметрового диапазона длин волн. Отчет по НИР № 300225 (Государственный контракт № П684 от 20 мая 2010 г. и Дополнению от 14 марта 2011 г. № 1). Этап 5. СПб., 2012. – 214 с.

Литература

1. Коняхин И.А., Копылова Т.В. Трехкоординатный оптико-электронный угломер со специальным построением канала измерения угла скручивания // 9 Международная конференция «Прикладная оптика — 2010» (ГОИ им. С.И. Вавилова, 18–22 октября 2010): Сб. трудов. Т. 1. Ч. 2. СПб., 2010. С. 146–149.

2. Коняхин И.А., Копылова Т.В. Трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 6 (70). С. 9–11.

3. Konyakhin I.A., Kopylova T.V., Konyakhin A.I. Optic-electronic autocollimation sensor for measurement of the three-axis angular deformation of industry objects // Proceedings of SPIE 8439. 84391N (April 23, 2012): <http://dx.doi.org/10.1117/12.922096>.
4. Коныхин И.А., Копылова Т.В. Оптико-электронная автоколлимационная система инвариантного измерения угла скручивания // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5 (75). С. 11–13.
5. Коныхин И.А., Панков Э.Д. Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры: Справочник. М., 1991. – 224 с.
6. Джабиев А.Н., Коныхин И.А., Панков Э.Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб., 2000. – 197 с.
7. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. Л., 1982. – 237 с.
8. ГОСТ 8.326-89 Метрологическая аттестация средств измерения: <http://www.docload.ru/Basesdoc/8/8986/index.htm>.
9. Аникст Д.А., Константинович К.М., Меськин И.В., Панков Э.Д. Высокоточные угловые измерения. М., 1987. – 480 с.
10. Елизаренко А.С., Парвулюсов Ю.Б., Солдатов В.П., Якушенков Ю.Г. Геодезические методы при исследовании высокоточных оптико-электронных угломеров // Состояние и перспективы дальнейшего развития геодезической службы СССР: Сб. материалов Всесоюзной конференции (Москва, 1974). М., 1976. С. 38–42.
11. Деденко Л.Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. М., 1977.
12. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. Л., 1987. – 295 с.



Черевков Сергей Александрович
Факультет фотоники и оптоинформаники
Кафедра оптической физики и современного естествознания
E-mail: cherep777@yandex.ru

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ДВУМЕРНЫХ КВАНТОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКА CdSe

С.А. Черевков

Научный руководитель – профессор А.В. Баранов

Введение

Нульмерные [1] и одномерные [2] коллоидные полупроводниковые нанокристаллы, известные как коллоидные квантовые точки и квантовые стержни с хорошо контролируемым размером, формой и распределением интенсивно исследуются уже более десяти лет [3]. Их уникальные оптические и электрические свойства в сочетании с хорошо разработанными

технологиями синтеза привели к тому, что они находят все более широкое применение в биомедицинской маркировке [4] при разработке новых наноматериалов для солнечных батарей [5], светодиодов [6] и наносенсоров. При этом до последнего времени совсем мало внимания уделялось исследованию двумерных (2D) коллоидных полупроводниковых нанокристаллов или нанопластин, пространственное квантование носителей заряда в которых имеет место только в одном измерении.

О синтезе коллоидных нанопластин полупроводника CdSe в жидких растворах впервые сообщалось еще в 2006 г. Однако методики воспроизводимого синтеза нанопластин CdSe с поперечными размерами до единиц микрон, толщина которых может контролируемым образом меняться от 3 до 7 монослоев полупроводника, то есть составлять менее 5 нм [7, 8], были разработаны совсем недавно.

На рис. 1а показаны возможные механизмы образования нанопластин CdSe в жидких растворах. Первым шагом является формирование нанокристаллов CdSe с размерами менее 2 нм в результате реакции исходных ионов Cd и Se. Далее возможны два механизма образования нанопластин. В первом случае в результате самоорганизации нанокристаллов в 2D-структуру. Во втором – происходит формирование 2D-структуры за счет исходных ионов Cd и Se.

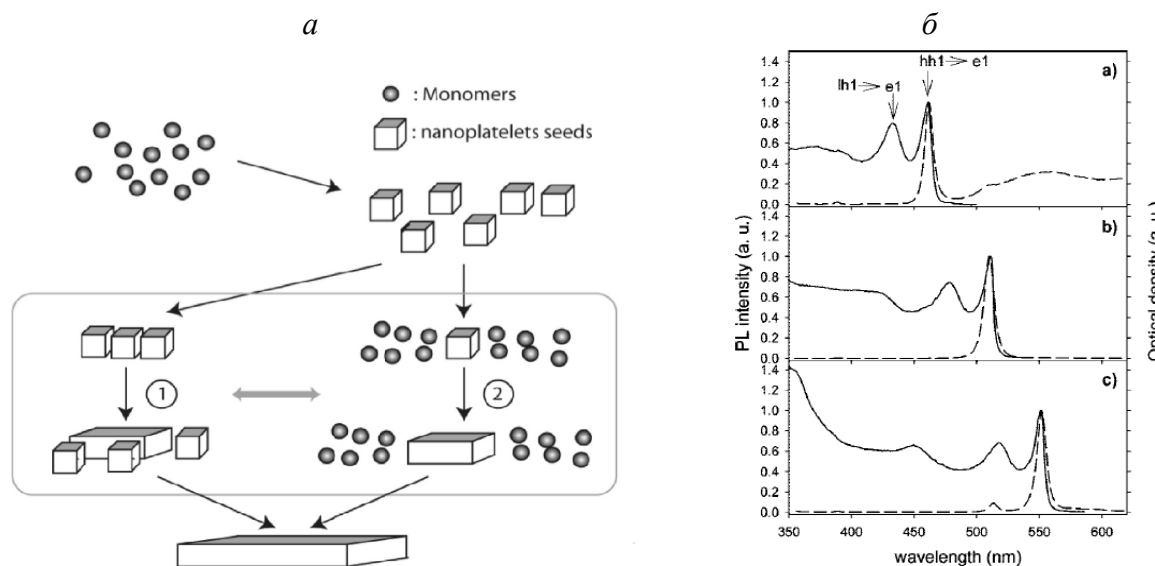


Рис. 1. а – возможные механизмы образования нанопластин CdSe; б – характерные спектры поглощения и люминесценции 2D-структур CdSe различной толщины

Предполагается, что 2D-наноструктуры CdSe, являющиеся в некотором смысле полупроводниковыми аналогами графена, могут обладать необычными электрическими и оптическими свойствами. В частности их электронная энергетическая структура и оптические свойства должны быть аналогичны свойствам квантовой ямы, где энергия экситона зависит от толщины ямы:

$$\hbar\omega_n = E_g + E_{hhn} + E_{cn} = E_g + \hbar^2 n^2 \pi^2 2m_{hh}^* d^2 + \hbar^2 n^2 \pi^2 / 2m_c^* d^2,$$

где E_g – ширина запрещенной зоны, n – номер межзонного перехода, m_{hh}^* и m_c^* – эффективные массы дырки и электрона, d – толщина квантовой ямы.

На рис.1б показано, что энергии оптических (экситонных) переходов увеличиваются с уменьшением толщины 2D-структур CdSe. С другой стороны, коллоидные 2D-нанокристаллы, аналогично коллоидным нанокристаллам – квантовым точкам, предоставляют возможность создания на их основе более сложных самоорганизованных наноструктур с необычными

оптическими свойствами. Однако большая часть работ, опубликованных на сегодняшний день, ориентирована на изучение механизмов роста и морфологии 2D-нанокристаллов. Работы, посвященные исследованию их электронной и фононной структур в зависимости от толщины нанокристаллов, практически отсутствуют.

Целью проекта является исследование оптических свойств и структуры двумерных нанокристаллов на основе CdSe методами абсорбционно-люминесцентной спектроскопии и спектроскопии резонансного микрокомбинационного рассеяния света (микро-КР).

Для достижения этой цели было необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ формы и размеров нанопластин CdSe методами электронной микроскопии;
- получить и проанализировать спектры поглощения и люминесценции нанокристаллов;
- установить корреляцию между толщиной нанопластин CdSe и их люминесцентными параметрами;
- получить спектры микро-КР двумерных наноструктур CdSe и провести соотнесение полос в спектре фонным модам материала;
- на основании анализа полученных спектров обнаружить специфическую для данных структур поверхностную моду CdSe;
- установить зависимость положения LO-фононной моды CdSe в зависимости от толщины структуры.

Оптические свойства и структурный анализ двумерных квантовых нанокристаллов полупроводника CdSe

Используемые материалы и методы исследования

Для выполнения проекта исследованы 2D-нанокристаллы CdSe с толщиной 5, 6 и 7 монослоев CdSe с фундаментальным экситонным переходом на 460, 515 и 550 нм, соответственно. При возбуждении излучениями с длинами волн 457, 514,5 и 632,8 нм, первые два из которых находятся в резонансе с экситонными переходами нанопластин с толщиной 5 и 6 монослоев, а последнее можно рассматривать как нерезонансное для всех трех образцов. Спектры резонансного комбинационного рассеяния (КР) света получены с использованием спектрометра микро-КР «inVia Renishaw» при комнатной температуре. Для получения спектров поглощения и люминесценции наноструктур были использованы спектрофотометр «Shimadzu UV3000» и спектрофлюориметр «Carry». Поскольку образцы нанопластин CdSe обычно сильно люминесцируют, для регистрации спектров КР применен разработанный нами метод тушения люминесценции нанокристаллов CdSe путем присоединения к их поверхности молекул тиоглюконата натрия.

Разработка методов синтеза плоских нанокристаллов CdSe

Плоские нанокристаллы CdSe представляют собой чрезвычайно интересный класс квантоворазмерных наноструктур, являющихся аналогами квантовых ям, получаемых эпитаксиальными методами. В отличие от сферических нанокристаллов CdSe (квантовых точек) плоские нанокристаллы CdSe формируются в условиях анизотропного роста по определенным кристаллографическим направлениям. В отличие от наностержней CdSe плоские нанокристаллы CdSe имеют кубическую модификацию, тогда как наностержни обладают гексагональной структурой. Для формирования плоских нанокристаллов CdSe

необходимо присутствие в реакционной смеси солей уксусной кислоты (ацетатов). Предполагается, что ацетаты селективным образом адсорбируются на кристаллографических гранях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 101 \rangle$ кубической модификации и рост нанокристаллов продолжается вдоль направления $\langle 001 \rangle$.

Синтез плоских нанокристаллов CdSe осуществлялся по нескольким методикам. Базовая методика синтеза состоит из следующих стадий. В трехгорлую колбу объемом 25 мл, снабженную насадками для вакуумной сушки, продувки аргоном, впрыска реагентов посредством шприца и термопарой загружалось 0,15 ммоль лаурата кадмия, 0,15 ммоль элементарного селена и 0,1 ммоль лауриновой кислоты в 8 мл октадецена. В атмосфере аргона при непрерывном перемешивании на магнитной мешалке смесь нагревалась до 195 °С до образования коллоидного раствора оранжевого цвета, состоящего из ультрамалых кластеров CdSe. Затем, в реакционную смесь вводилось 0,15 ммоль ацетата кадмия в порошке и смесь нагревалась до 240 °С и перемешивалась 3 мин. За это время цвет реакционной смеси менялся от оранжевого до темно-красного. По окончании реакции смесь охлаждалась до 80 °С, и нанокристаллы CdSe осаждались из реакционной смеси добавлением равного объема изопропанола. Осадок нанокристаллов центрифугировался в течение 5 мин при скорости 5000 об/мин, дважды промывался метанолом для удаления органических соединений и непрореагировавших прекурсоров и растворялся в 5 мл хлороформа с добавлением 100 мг лауриновой кислоты в качестве стабилизатора коллоидных наночастиц CdSe.

Анализ морфологии полученных наночастиц CdSe осуществлялся с помощью просвечивающего электронного микроскопа. Примерно 100 мкл коллоидного раствора нанокристаллов CdSe в хлороформе смешивалось с 1 мл метанола, выпавшие нанокристаллы промывались трижды метанолом для удаления избытка лауриновой кислоты и растворялись в 2 мл гексана. Раствор нанокристаллов в гексане наносился на поверхность сеточек для электронной микроскопии, покрытых пленкой формвара с углеродным напылением. На рис. 2 представлены электронномикроскопические снимки нанокристаллов CdSe, полученные по описанной методике.

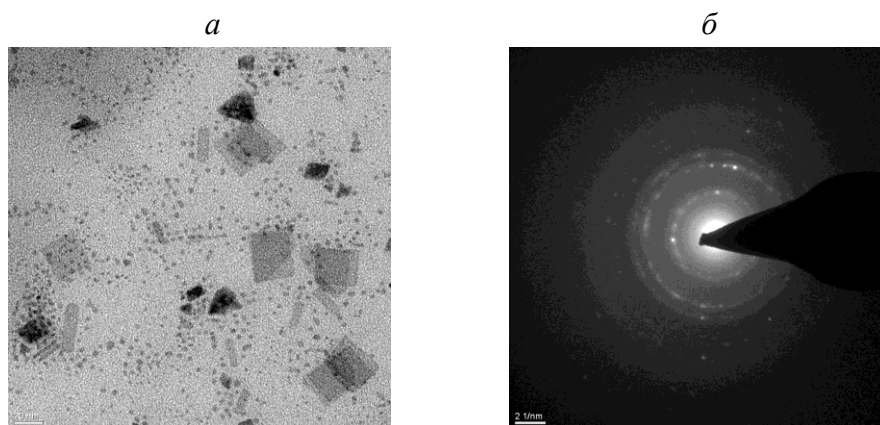


Рис. 2. а – электронномикроскопическое изображение плоских нанокристаллов CdSe; б – электронная дифракция указанного участка. Масштаб снимка – в левом нижнем углу

Изображения, представленные на рис. 2, подтверждают, что рассмотренная методика позволяет получать плоские нанокристаллы квадратной, либо прямоугольной формы сверхмалой толщины, поскольку такие нанокристаллы являются полупрозрачными для электронного пучка и через них можно наблюдать нанокристаллы на нижних ярусах. Это говорит о том, что толщина нанокристаллов составляет всего несколько периодов кристаллической решетки CdSe. Помимо плоских нанокристаллов на снимке присутствует значительное количество мелких нанокристаллов сферической, либо близкой к ним формы,

которые являются, по-видимому, исходными зародышами CdSe, образовавшимися на первой стадии реакции. Плоские нанокристаллы CdSe могут быть отделены от сферических посредством размерно-селективного осаждения и контролируемого центрифугирования. Метод электронной дифракции участка образца с плоскими нанокристаллами подтверждает кубическую кристаллическую модификацию полученных нанокристаллов CdSe.

На рис. 3 представлены спектры оптического поглощения фотолюминесценции (ФЛ) коллоидного раствора нанокристаллов CdSe в хлороформе. Наблюдается наличие набора узких спектральных линий, относящихся как к спектральным переходам различной симметрии, принадлежащим одному типу нанокристаллов, так и к переходам, принадлежащим разным типам нанокристаллов. Разделение вклада плоских нанокристаллов различной толщины может быть сделано на основе анализа спектров люминесценции.

На рис. 3 хорошо видно, что в образце присутствуют три типа плоских нанокристаллов CdSe различной толщины, кратной одному слою Cd-Se: нанокристаллы с полосой люминесценции в области 460 нм (полоса поглощения в области 460 нм), 515 нм (поглощение в области 512 и 480 нм) и 550 нм (поглощение в области 550 нм). Чрезвычайно малая величина Стоксова сдвига, составляющая около 1-2 нм, является дополнительным свидетельством формирования плоских нанокристаллов CdSe с одномерным квантованием энергетических уровней перпендикулярно плоскости нанокристаллов.

В отличие от плоских нанокристаллов CdSe, в квантовых точках и наностержнях CdSe Стоксов сдвиг составляет около 10–20 нм в зависимости от размера нанокристаллов. Исходя из теоретических предпосылок, можно отнести полосы люминесценции в области 460 нм к плоским нанокристаллам толщиной в 5, 515 нм – 6 и 550 нм – 7 монослоев Cd-Se.

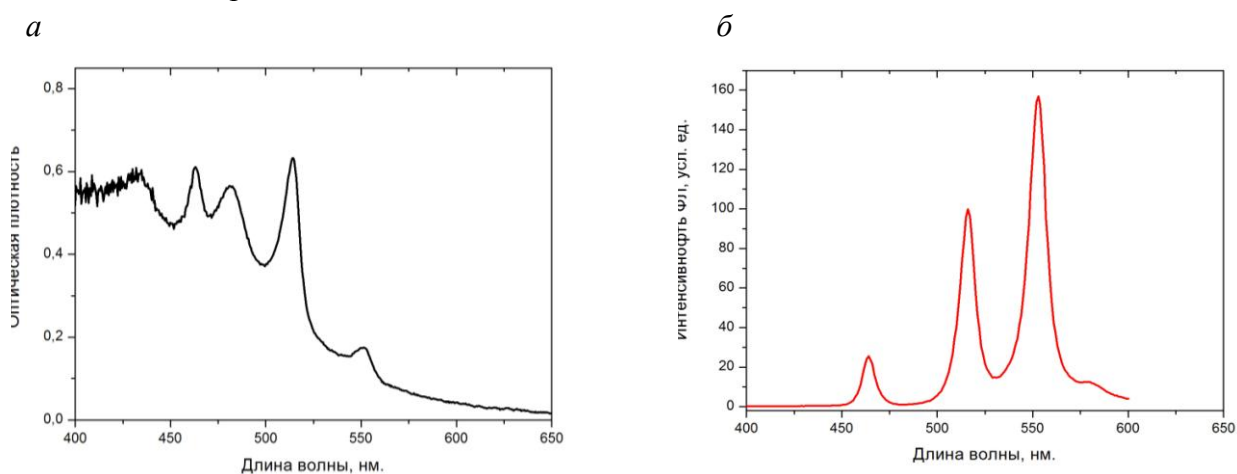


Рис. 3. Ансамбль плоских нанокристаллов CdSe в коллоидном растворе в хлороформе: а – спектр оптического поглощения; б – спектр фотолюминесценции. Длина волны возбуждения ФЛ 350 нм

Важный вывод из полученных данных состоит в том, что применявшаяся методика синтеза плоских нанокристаллов CdSe приводит к одновременному формированию плоских нанокристаллов различной толщины, которые невозможно разделить простыми методами размерно-селективного осаждения в силу их большого латерального размера. В связи с этим были разработаны методы синтеза, которые давали плоские нанокристаллы преимущественно одинаковой толщины. Методики таких синтезов предполагают использование разных типов алифатических карбоновых кислот для термодинамической стабилизации выбранного типа нанокристаллов в процессе роста.

Синтез плоских нанокристаллов CdSe с полосой поглощения в области 460 нм

В трехгорлую колбу объемом 25 мл, снабженную насадками для вакуумной сушки, продувки аргоном, впрыска реагентов посредством шприца и термопарой загружалось 0,4 ммоль ацетата кадмия, 0,1 ммоль элементарного селена, 0,1 ммоль стеариновой кислоты и 10 мл октадецена. Реакционная смесь дегазировалась под вакуумом в течение 30 мин при комнатной температуре. Затем ее нагревали в атмосфере аргона до 180 °С и перемешивали в течение 10–60 мин для достижения монодисперсности нанокристаллов, что контролировалось по изменению формы полосы экситонного поглощения. По окончании реакции смесь охлаждалась до 80 °С и нанокристаллы CdSe осаждались из нее добавлением равного объема изопропанола. Осадок нанокристаллов центрифугировался в течение 5 мин при скорости 5000 об/мин, дважды промывался метанолом для удаления органических соединений и непрореагировавших прекурсоров и растворялся в 5 мл хлороформа с добавлением 100 мкл олеиновой кислоты в качестве стабилизатора коллоидных наночастиц CdSe.

Синтез плоских нанокристаллов CdSe с полосой поглощения в области 515 нм

В трехгорлую колбу объемом 25 мл, снабженную насадками для вакуумной сушки, продувки аргоном, впрыска реагентов посредством шприца и термопарой загружалось 0,3 ммоль миристана кадмия, 0,15 ммоль элементарного селена и 15 мл октадецена. Реакционная смесь дегазировалась под вакуумом в течение 30 мин при комнатной температуре. Затем ее нагревали в атмосфере аргона до 190 °С и добавляли 0,3 ммоль ацетата цинка, после быстро нагревали до 240 °С. При этой температуре реакционная смесь дополнительно созревала в течение 10 мин. По окончании реакции смесь охлаждалась до 80 °С и нанокристаллы CdSe осаждались из реакционной смеси добавлением равного объема изопропанола. Осадок нанокристаллов центрифугировался в течение 5 мин при скорости 5000 об/мин, дважды промывался метанолом для удаления органических соединений и непрореагировавших прекурсоров и растворялся в 5 мл хлороформа с добавлением 100 мкл олеиновой кислоты в качестве стабилизатора коллоидных наночастиц CdSe.

Синтез плоских нанокристаллов CdSe с полосой поглощения в области 550 нм

В трехгорлую колбу объемом 25 мл, снабженную насадками для вакуумной сушки, продувки аргоном, впрыска реагентов посредством шприца и термопарой загружалось 0,4 ммоль стеарата кадмия, 0,1 ммоль элементарного селена и 10 мл октадецена. Реакционная смесь дегазировалась под вакуумом в течение 30 мин при комнатной температуре. Затем ее нагревали в атмосфере аргона до 180 °С и выдерживали при перемешивании в течение 10 мин. После в смесь добавляли 0,8 ммоль ацетата кадмия в порошке и нагревали ее до 240 °С. При этой температуре смесь дополнительно перемешивали в течение 30 мин. По окончании реакции смесь охлаждалась до 80 °С, и нанокристаллы CdSe осаждались из нее добавлением равного объема изопропанола. Осадок нанокристаллов центрифугировался в течение 5 мин при скорости 5000 об/мин, дважды промывался метанолом для удаления органических соединений и непрореагировавших прекурсоров и растворялся в 5 мл хлороформа с добавлением 100 мкл олеиновой кислоты в качестве стабилизатора коллоидных наночастиц CdSe.

Спектры поглощения и люминесценции нанокристаллов CdSe различной толщины

На рис. 4 представлены спектры поглощения всех трех типов плоских нанокристаллов CdSe толщиной 5, 6 и 7 монослоев CdSe.

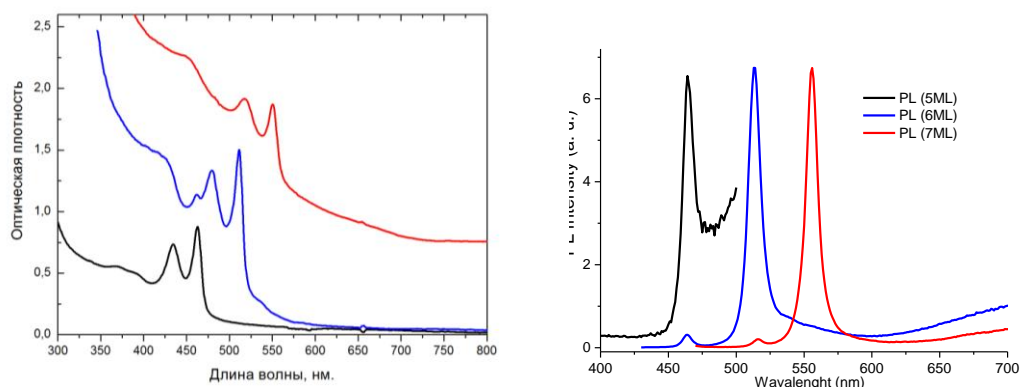


Рис. 4. Спектры поглощения и люминесценции плоских нанокристаллов CdSe толщиной 5 (черный), 6 (синий) и 7 (красный) монослоев CdSe в коллоидном растворе в хлороформе

Разработанные методы синтеза позволяют получать практически монодисперсные по толщине образцы плоских нанокристаллов CdSe заданной толщины. При этом увеличение толщины приводит к сильному сдвигу полос поглощения и люминесценции нанокристаллов в длинноволновую область спектра. Электронномикроскопическое исследование данных образцов нанокристаллов подтверждает их высокую монодисперсность не только по толщине, но и по латеральным размерам (рис. 5).

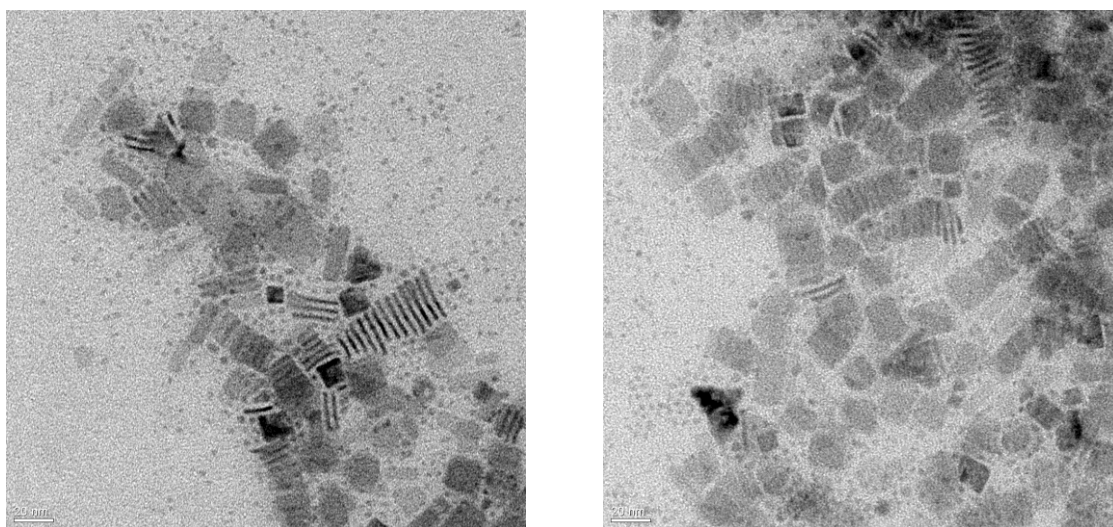


Рис. 5. Электронномикроскопические снимки плоских нанокристаллов CdSe толщиной 5 монослоев. Масштаб изображения указан в левом нижнем углу снимка

Из рис. 5 видно, что высокая монодисперсность плоских нанокристаллов приводит к формированию агрегатов, в которых нанокристаллы сложены стопкой и наблюдаются с торцевой стороны. Формирование агрегатов плоских нанокристаллов связано с наличием у них большого дипольного момента в силу терминируемости противоположных граней атомами кадмия и селена.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) плоских нанокристаллов CdSe

Нами впервые получены спектры резонансного КР света 2D-нанокристаллов CdSe с толщиной 5, 6 и 7 монослоев CdSe с фундаментальным экситонным переходом на 460, 515 и 550 нм, соответственно. Спектры поглощения исследованных образцов приведены на рис. 6.

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

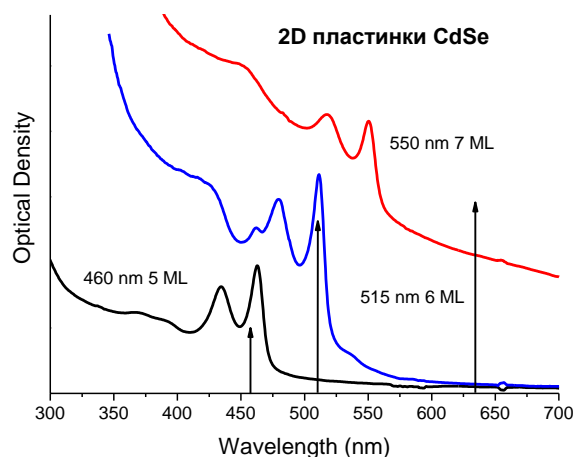


Рис. 6. Спектры поглощения образцов 2D-нанокристаллов CdSe с толщиной 5, 6 и 7 монослоев CdSe с фундаментальным экситонным переходом на 460, 515 и 550 нм. Стрелками показаны длины волн возбуждающих КР излучений

Спектры КР возбуждались излучениями с длинами волн 457, 514,5 и 632,8 нм, первые два из которых находятся в резонансе с экситонными переходами нанопластин с толщиной 5 и 6 монослоев, а последнее можно рассматривать как нерезонансное для всех трех образцов. Поскольку образцы сильно люминесцировали, для измерения спектров КР люминесценция была потушена путем присоединения к поверхности нанопластин молекул тиоглюконата натрия $C_2H_3NaO_2-S$.

Для этого образцы растворялись в хлороформе и обрабатывались в ультразвуковой бане для диспергирования возможных агрегатов. К полученному раствору добавлялся равный объем метанола, что приводило к выпадению нанопластин в осадок. Осадок отцентрифугировался в течение 3 мин при скорости 5000 об/мин и снова растворялся в свежей порции хлороформа (2 мл). 200 мкл раствора тиогликолята натрия в метаноле (50 мг/мл) было добавлено к раствору нанокристаллов и оставлено для прохождения реакции замещения на ночь. Выпавший осадок отцентрифугирован, промыт два раза в 2 мл метанола при хорошем взбалтывании. На окончательной стадии осадок залит 200 мкл метанола. Полученная нелюминесцирующая суспензия тщательно размешивалась, наносилась на медную подложку и высушивалась при комнатной температуре для проведения измерений спектров КР.

Спектры были получены с использованием спектрометра микро-КР «inVia Renishaw» при комнатной температуре. Возбуждающие излучения фокусировались на образцы микрообъективом 50x с $NA = 0,75$ в пятно с размером ~ 1 мкм. Мощность возбуждающего излучения на образце не превышала 0,05 мВт во избежание теплового воздействия излучения на образец. Общее время записи одного спектра составляло от 5 до 20 минут.

В приведенных на рис. 7 спектрах всех образцов доминирует полоса продольных фононов (LO-фононов) CdSe с частотой ~ 206 cm^{-1} , характерной для объемного полупроводника, а также слабая полоса 2LO-фонона с частотой ~ 410 cm^{-1} . Частоты этих полос одинаковы для всех образцов, что свидетельствует о преобладании в процессе нерезонансного КР фононов, распространяющихся вдоль плоскости нанопластин, где отсутствует эффект пространственного ограничения для оптических фононов. Совсем иная картина наблюдается в спектрах резонансного КР образцов, возбуждаемых излучением 514,5 и 457 нм, представленных на рис. 8 и 9.

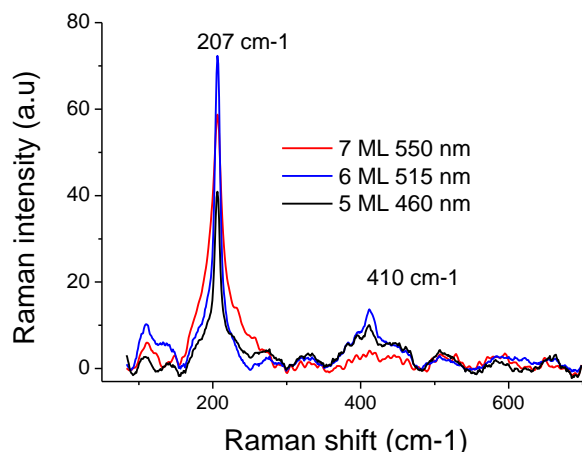


Рис. 7. Спектры КР образцов нанопластин CdSe с толщиной 5, 6 и 7 монослоев CdSe с фундаментальным экситонным переходом на 460, 515 и 550 нм, соответственно, при возбуждении излучением с длиной волны 633 нм

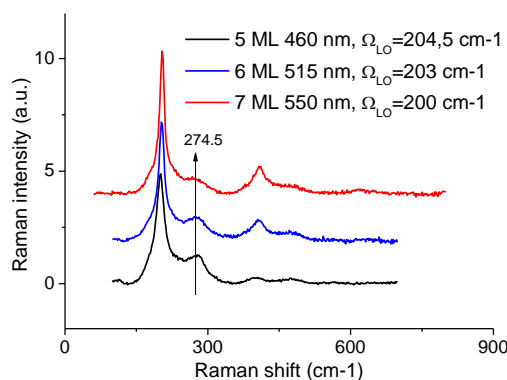


Рис. 8. Спектры КР образцов нанопластин CdSe с толщиной 5, 6 и 7 монослоев CdSe с фундаментальным экситонным переходом на 460, 515 и 550 нм, соответственно, при возбуждении излучением с длиной волны 514 нм

Анализ положения полосы LO-фонона показывает, что ее частота уменьшается от 204.5 см^{-1} до 200 см^{-1} при уменьшении толщины нанопластин CdSe от 7 до 5 монослоев, при этом увеличивается ширина полос. Близкое по величине уменьшение частоты LO-фонона и уширение полосы КР также наблюдается при уменьшении размера квантовых точек CdSe в аналогичном диапазоне размеров, что обычно связывается с размерным квантованием их энергии. Поэтому естественно отнести наблюдаемое нами уменьшение частоты LO-фонона к уменьшению толщины нанопластин CdSe также к проявлению эффекта пространственного ограничения оптических фононов в направлении перпендикулярном плоскости пластин.

Еще отчетливее этот эффект виден при возбуждении спектров излучением 457 нм (рис. 9). Здесь также виден явный размерный сдвиг частот LO- и 2 LO-фононов при уменьшении толщины нанопластин CdSe от 6 до 5 монослоев. На рис. 9 также показаны полосы с частотами 180 см^{-1} и 230 см^{-1} , которые наблюдаются в спектрах микро-КР всех исследуемых образцов с той или иной степенью надежности. Предположительно, они могут быть приписаны поверхностным фононам 2D-нанокристаллов CdSe. Однако их достоверное отнесение, а также зависимость параметров от толщины нанопластин требует дополнительного исследования.

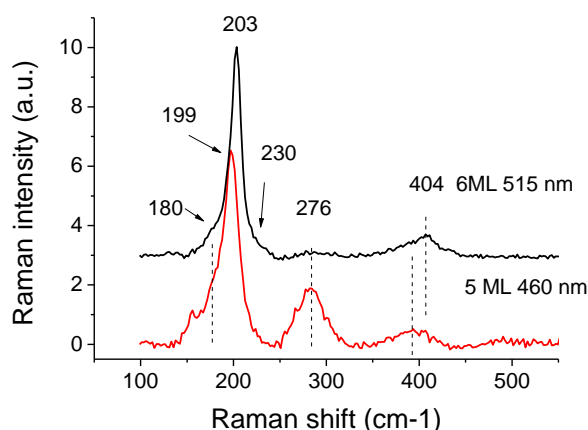


Рис. 9. Спектры КР образцов нанопластин CdSe с толщиной 5 и 6 монослоев CdSe с фундаментальным экситонным переходом на 460 и 515 нм, соответственно, при возбуждении излучением с длиной волны 457 нм. Показаны частоты полос в см^{-1}

Отдельно следует остановиться на анализе свойств полосы КР с частотой 274–276 см^{-1} . Полученные данные показывают, что при возбуждении излучением одной длины волны (рис. 8) ее относительная интенсивность возрастает с уменьшением толщины нанопластины. С другой стороны, для нанопластин одной толщины интенсивность этой полосы увеличивается с уменьшением длины волны возбуждения, как это видно на рис. 10.

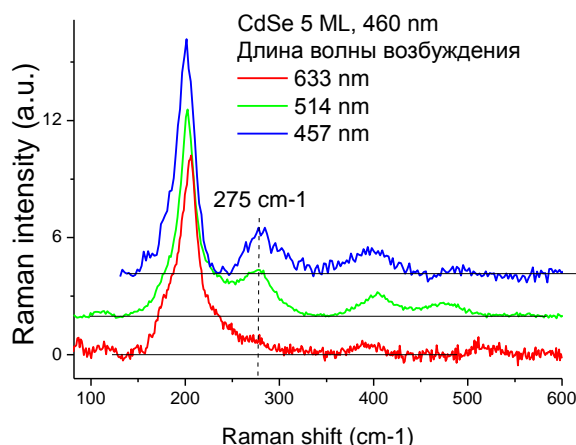


Рис. 10. Спектры КР образца нанопластин CdSe с толщиной 5 монослоя при возбуждении излучениями с длинами волн 457, 514 и 633 нм

Такое поведение позволяет предположить, что полоса соответствует колебаниям структуры, связанной с поверхностью нанопластинок, поскольку относительный вклад поверхностных атомов увеличивается с уменьшением толщины. Причем структура должна иметь электронный переход в области больших энергий, чем CdSe, в резонанс с которым попадает возбуждающее излучение с короткими длинами волн. Подходящим в данном случае является тонкий слой CdS. Причем известно [9], что в спектрах КР нанокристаллов типа ядро / оболочка CdSe / CdS частота полосы, соответствующей LO фонону CdS (290 см^{-1} у объемного материала) уменьшается при уменьшении толщины оболочки и достигает приблизительно 270 см^{-1} при толщине приблизительно в один монослой, что близко к частоте наблюдаемой нами полосы. Поэтому полосу с частотой 275 см^{-1} можно отнести к фонону колебанию тонкого слоя CdS на поверхности образца.

Анализ экспериментальных данных показал, что в используемой нами процедуре тушения люминесценции образование монослоя связей Cd-S на поверхности исследуемых нанопластин CdSe вполне возможно за счет присоединения тиогликолята натрия, содержащего серу.

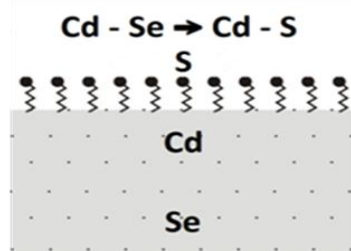


Рис. 11. Присоединение атомов серы на поверхность плоских нанокристаллов CdSe с образованием монослоя CdS

Таким образом, в спектрах микро-КР образцов 2D-нанокристаллов CdSe с различным количеством монослоев наблюдаются характерные для данного вещества пики на частотах ~ 180 , 203 , 370 и 406 см^{-1} , где пики $\sim 180 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 203 \text{ см}^{-1}$ соответствуют поверхностному (SO) и LO фоновым модам материала, а так же их обертонам (370 см^{-1} и 406 см^{-1}). Отнесение полос 230 и 470 см^{-1} не столь очевидно. Предполагается, что они связаны с плоской формой наночастиц. При уменьшении толщины нанопластин наблюдается небольшое уменьшение частоты полос LO-фонона и его обертона, что связано с эффектом пространственного ограничения оптических фононов.

Заключение

Спектроскопия резонансного комбинационного рассеяния открывает новые возможности в получении информации о структурных параметрах 2D-нанокристаллов CdSe и об их фоновых спектрах.

Полученные результаты являются новыми. Они могут быть использованы в создании квантоворазмерных структур с заданными оптическими, электрическими и другими свойствами. Структуры на основе нанокристаллов CdSe применимы в биомедицинской маркировке при разработке новых наноматериалов для солнечных батарей, светодиодов и наносенсоров. Также коллоидные плоские нанокристаллы CdSe с контролируемыми на атомном уровне толщиной и поперечными размерами должны быть полезны для проверки предсказаний, сделанных для 2D квантовых коробок.

Например, сила осциллятора этих нанокристаллов, по прогнозам, многократно увеличивается при возрастании пространственного удержания экситона. Эта усовершенствованная сила осциллятора приводит к интересным нелинейным свойствам и может применяться для эффективных нелинейно-оптических устройств. Рост множества квантовых ям приводит к развитию ряда приложений, включая квантовые каскадные лазеры. Дальнейшее исследование и внедрение нанопластин может привести к созданию подобных устройств.

Публикации

Результаты работы по проекту направлены для опубликования в реферируемый научный журнал. Полученные результаты доложены на третьем международном симпозиуме «Molecular Photonics», 24-29 июня 2012, Санкт-Петербург, Россия, а также приняты в качестве

устного доклада на VII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики», 15-19 октября 2012 года, Санкт-Петербург, Россия.

Литература

1. Peng Z.A., Peng X.G. Formation of High-Quality CdTe, CdSe, and CdS Nanocrystals Using CdO as Precursor // Journal of the American chemical society. 2001. Vol. 123. P. 183–184.
2. Peng X.G., Manna L., Yang W.D., Wickham J., Scher E., Kadavanich A., Alivisatos A.P. Shape control of CdSe nanocrystals // Nature. 2000. Vol. 404. P. 59–61.
3. Murray C.B., Kagan C.R., Bawendi M.G. Synthesis and characterization of monodisperse nanocrystals and close-packed nanocrystal assemblies // Annual review of materials science. 2000. Vol. 30. P. 545–610.
4. Bruchez M., Moronne M., Gin P., Weiss S., Alivisatos A.P. Semiconductor Nanocrystals as Fluorescent Biological Labels // Science. 1998. Vol. 281. P. 2013–2016.
5. Huynh W.U., Dittmer J.J., Alivisatos A.P. Hybrid Nanorod-Polymer Solar Cells // Science. 2002. Vol. 295. P. 2425–2427.
6. Coe S., Woo W.K., Bawendi M., Bulovic V. Electroluminescence from single monolayers of nanocrystals in molecular organic devices // Nature. 2002. Vol. 420. P. 800–803.
7. Ithurria S., Bousquet G., Dubertret B. Continuous Transition from 3D to 1D Confinement Observed during the Formation of CdSe Nanoplatelets // Journal of the American chemical society. 2011. Vol. 133. P. 3070–3077.
8. Ithurria S., Dubertret B. Quasi 2D Colloidal CdSe Platelets with Thicknesses Controlled at the Atomic Level // Journal of the American chemical society. 2008. Vol. 130. P. 16504–16505.
9. Tschirner N., Lange H., Schliwa A., Biermann A., Thomsen C., Lambert K., Gomes R., Hens Z. Interfacial Alloying in CdSe/CdS Heteronanocrystals: A Raman Spectroscopy Analysis // Journal of materials chemistry. 2012. Vol. 24. P. 311–318.



Ширшнев Павел Сергеевич
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптоинформационных технологий и материалов
E-mail: pavel.shirshnev@gmail.com

НАНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ЗРЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

П.С. Ширшнев

Научный руководитель – профессор Н.В. Никоноров

Введение

Объектом разработки являются калиевоалюмооборатные стекла с наночастицами хлорида меди. Разрабатывается новый оптический материал для защиты органов зрения и оптико-электронных приемных систем от лазерного излучения. В процессе работы проводились синтез калиевоалюмооборатных стекол с наночастицами CuCl и исследования

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

спектров поглощения, нелинейно-оптических и физико-химических свойств полученных материалов.

Анализ физико-химических свойств прототипов разрабатываемой наностеклокерамики

Композитные материалы с полупроводниковыми наночастицами представляют большой практический интерес для создания быстродействующих оптических ограничителей, высокоэффективных УФ-фильтров, возможны также приложения в областях записи информации, интегральной оптики. Нелинейно-оптический отклик в таких материалах может быть вызван насыщением экситонного [1, 2] и межзонного поглощений (эффект Бурштейна-Мосса) [3], фотогенерацией центров окраски [3], изменением показателя преломления [4] и другими эффектами.

Эффекты, связанные с просветлением композитных сред с полупроводниковыми наночастицами и квантовыми точками на основе халькогенидов металлов исследованы достаточно подробно [4, 5]. В оптических композитах с наночастицами галогенидов металлов под действием излучения может наблюдаться как эффект просветления в узком спектральном интервале, вызванный насыщением экситонного поглощения, так и широкополосные эффекты оптического ограничения, вызванные фотогенерацией центров окраски или обратимым фотолизом [4]. Последний эффект используется в фотохромных стеклах с наночастицами галогенидов серебра и меди [6]. Оптическое ограничение в результате фотогенерации центров окраски наблюдалось в суспензиях наночастиц галогенидов серебра при воздействии пикосекундных импульсов излучения в видимой области спектра [7].

Для практического применения представляют интерес твердые композитные среды, обладающие высоким оптическим качеством, малыми потерями, высокими эксплуатационными характеристиками (механической и термической прочностью, химической устойчивостью) и технологичностью. Этим критериям отвечают фотохромные стекла с наночастицами хлорида меди.

Нанокристалл CuCl позволяет продемонстрировать резкое изменение физических свойств, вызванное его малыми размерами:

- зависимость температуры плавления от размера кристалла (закон Томпсона) [6];
- склонность кристаллов малых размеров к переохлаждению [6];
- квантовый размерный эффект, зависимость положения экситонных полос поглощения от размеров нанокристаллов [6];
- провалы, наблюдаемые при низкой температуре в области полосы Z_3 экситона, при интенсивном облучении, связанные с образованием биэкситонов [6].

Как отмечается в [6], макрокристаллы CuCl обладают высокими нелинейными оптическими свойствами, в частности высоким двухфотонным поглощением. Например, по сравнению с ZnSe они имеют более высокие пороги разрушения лазерным излучением, так как в отличие от большинства полупроводников при повышении температуры запрещенная зона CuCl начинает расти, а не уменьшаться. Следовательно, они могут выдержать воздействие более длинных по времени лазерных импульсов. Ограничение излучения может происходить как за счет изменения показателя преломления (дефокусировка), так и вследствие двухфотонного поглощения и поглощения на свободных носителях. Особенно важно, что кристаллы CuCl не имеют полос оптического поглощения в видимой области спектра.

В данной работе анализируются механизмы нелинейного примесного поглощения в полупроводниках. На границе раздела фаз кристалл-стекло могут вследствие диффузии скапливаться примеси, что способствует появлению примесных уровней в запрещенной зоне кристалла. Нелинейно-оптические свойства, возможные в таких наноконкомпозитах, могут быть инициированы следующими процессами:

- фотогенерацией носителей заряда при примесном поглощении;
- диффузией свободных носителей заряда;
- примесной рекомбинацией;
- насыщением примесного поглощения;
- каскадными переходами;
- двухфотонным поглощением;
- межзонной рекомбинацией;
- поглощением излучения свободными носителями заряда;
- тепловыми процессами.

У стекла и кристалла CuCl разные коэффициенты термического расширения. Поэтому при остывании после термообработки кристалл сжимается быстрее стекла и отрывается от границы раздела фаз кристалл-стекло, где образуется вакуумная пора. Следствие такого явления подробно описано в [7]. При облучении в свободное пространство поры от поверхности кристалла CuCl улетучивается ионизированный хлор – так называемый галоидный газ. На поверхности кристалла образуется квазиметаллическая структура Cu_n , которая поглощает свет в видимой области спектра. При прекращении облучения идет обратный процесс – хлор оседает на поверхность кристалла из поры, структура CuCl на поверхности кристалла восстанавливается.

Совокупность свойств неорганических стекол, таких как высокая прозрачность в области светочувствительности кристаллов CuCl [7]; огромная вязкость (10^{23} Пуаз) при комнатной температуре, исключая уход меди или молекулярного галогена от места фотохимической реакции; низкая электронная и дырочная проводимость, делают их прекрасной «клеткой» для светочувствительных кристаллов. Особую роль играет способность стекол растворять галоидные соединения в расплаве и в закаленном охлажденном стекле и равномерно выделять их в специальном термическом процессе, позволяющем строго контролировать размеры кристаллов CuCl . Это позволяет получать кристаллы с размерами существенно меньше длины волны, то есть стекла с высокой прозрачностью. Изоляция кристаллов в стекле от влияния атмосферы особенно важна для кристалла CuCl , так как он является водно-растворимым.

В предыдущих работах по данной тематике [1] обсуждалось получение нанокристаллической фазы CuCl в силикатных матрицах. Основное внимание уделялось их фотохромным свойствам. В данной работе рассматриваются нелинейно-оптические, оптические и физико-химические свойства кристаллов CuCl в калий-алюмо-боратных матрицах. Нанокристаллы CuCl не имеют полос поглощения в видимой области спектра, хотя это полупроводниковые кристаллы, обладающие высоким нелинейным откликом поглощения. В связи с этим было необходимо получить технологически простое стекло со стабильными нанокристаллами CuCl .

Из работы [8] известно, что матрица $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ способствует выделению из исходного стекла кристаллов кислородных соединений железа, марганца, хрома. На рис. 1 приведен треугольник составов, с отмеченной на нем областью, в которой возможно выделение кристаллической фазы при термообработке. Однако не была проверена

возможность выделения нанокристаллов CuCl в данной матрице. Матрица интересна в том числе и относительно легкой технологией получения – температуры варки составляют 1300–1400 °С, расплав является менее агрессивным к огнеупору по сравнению с силикатными и фосфатными.

Получать кристаллы планировалось нагревом стекла до температур выше температуры стеклования – в результате нуклеации. Необратимое образование новой фазы начинается после формирования зародыша критического размера, когда его дальнейший рост становится энергетически выгодным. Размер критического зародыша зависит как от строения новой фазы, так и от среды, в которой он образуется. Одной из основных задач данной работы является поиск оптимального состава стекла, при котором образование критических зародышей может происходить уже на стадии отливки стекла. Сам состав должен создавать окружение из нужных кристаллам компонентов вокруг новой фазы, которое способствовало бы ее росту.

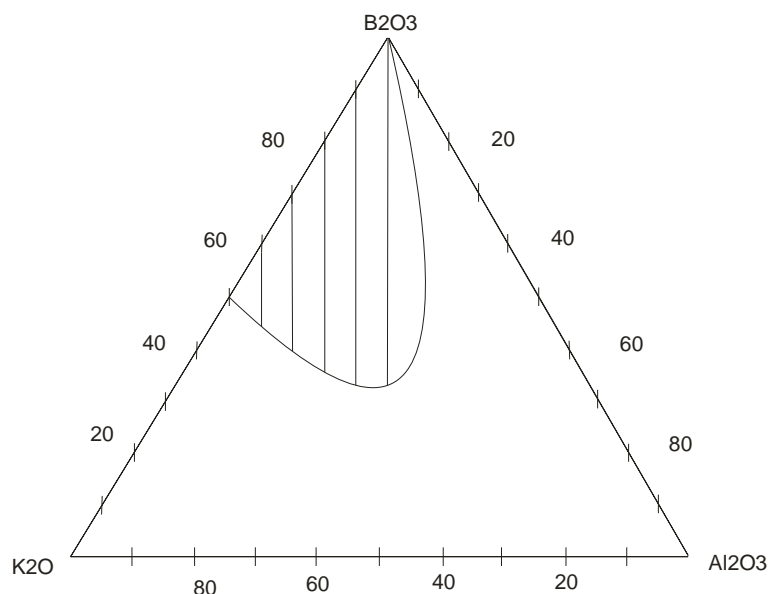


Рис. 1. Треугольник стеклообразующих составов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$

Известно, что температура плавления кристалла начинает зависеть от его размеров, когда количество атомов на его поверхности становится соизмеримо с их количеством в объеме. Естественно, это происходит и при нагреве стекла до температур выше температуры стеклования. Вполне возможна такая ситуация, при которой жидкая фаза с компонентами CuCl будет выделяться при температурах ниже температур плавления данного кристалла, так как здесь будут играть роль метастабильность расплава и, как следствие, более низкая температура кристаллизации данного расплава. Однако эффект Томпсона (лимитирование температуры плавления кристалла его размером) для кристалла CuCl является незначительным уже при его размере превышающем 15 нм.

Нанофаза в стекле может иметь сложный состав, в натриево-силикатных стеклах она включает и NaCl . Именно так была объяснена разница в десятки градусов температур плавления макрокристаллов CuCl и кристаллов CuCl размерами 15 нм в стекле. Как известно, температура плавления эвтектики ниже температуры плавления ее составляющих. Было показано, что CuCl-NaCl образует именно эвтектику. В стеклах $\text{K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ можно ожидать подобную ситуацию с CuCl-KCl . Если брать данные из [9], то температура плавления эвтектики CuCl-KCl составляет 150 °С. Состав эвтектики – 65 % (молярных) CuCl и 35 % (молярных) KCl .

Процесс получения кристаллов CuCl в стекле сложен тем, что стекло должно содержать компоненты кристалла – одновалентные медь и хлор. Причем не в стехиометрических количествах, то есть в таких, при которых компоненты не будут встраиваться в сетку и структурные единицы стекла или с легкостью заменяться другими компонентами. Однако нужная для этих целей область составов, при которых матрица не будет удерживать компоненты кристаллов при посттермической обработке стекла, была получена в работе [2].

Основной механизм, который планировалось использовать для стимуляции выпадения компонентов кристалла CuCl в жидкую фазу – это смена атома бора при более высоких температурах тетраэдрической координации на тригональную. В боро-щелочных стеклах бор может образовывать структурные единицы трех типов: симметричные треугольники BO_3 , борокислородные тетраэдры BO_4^- и ассиметричные треугольники $\text{BO}_{2/2}\text{O}^-$. При концентрации щелочных оксидов (в частности K_2O) более 15 % отчетливо прослеживалась тенденция понижения координационного числа у части атомов бора при повышении температуры. Динамическое равновесие между базовыми структурными группировками имеет вид: $[\text{BO}_{4/2}^-] \leftrightarrow \text{BO}_{2/2}\text{O}^-$

Концентрация симметричных тригональных группировок BO_3 не меняется с ростом температуры. А вот тетраэдры BO_4^- могут перестраиваться при повышении температуры стекла до температуры стеклования. При этом при высокой скорости охлаждения структура тетраэдров «замораживается» при некоторой температуре превышающей температуру стеклования. Иными словами, при охлаждении расплава в процессе варки, бор формирует структурные элементы стекла в виде тетраэдров и тригональных группировок, однако при термической обработке тетраэдры бора могут перестраиваться в тригональные группы, так как бор при нагреве изменит свою координацию.

Основная проблема получения кристаллов CuCl в стекле – изначальное присутствие в расплаве меди в одновалентной форме. Известно, что медь в соединениях может существовать в трех видах – Cu^0 (металлическая медь), Cu^{+1} и Cu^{+2} . Получить металлическую медь можно, введя в расплав восстановитель, и тем самым создав в нем жесткие восстановительные условия. Эта форма меди может быть полезна при необходимости получения ее металлических нанокристаллов в стекле или эффекта плазмонного резонанса на них.

Для получения двухвалентной формы меди, которая имеет широкую полосу поглощения в видимой области с максимумом 700 нм, в расплаве необходимо создать окислительные условия. Выделение одновалентной формы меди связано с созданием в расплаве промежуточных окислительно-восстановительных условий, что представляет определенные сложности. Расплав стекла – это сложная гетерогенная система, в которой имеются газовая и жидкая фазы. Основным компонентом, существенно влияющим на окислительно-восстановительный потенциал системы, является кислород. При температурах варки он существует или в виде соединений или в виде газовой фазы. Однако он может быть унесен из расплава другими более летучими (для данной температуры) газами, например, хлором. Парциальное давление внутри пузырька хлора маленькое, поэтому при движении внутри расплава он легко вбирает в себя другие газы, в том числе и кислород.

Для создания в расплаве (и непосредственно над его поверхностью) восстановительной атмосферы можно использовать соединения, которые при варке разлагаются на газообразные вещества, уносящие кислород или смещающие редокс-потенциал системы в сторону восстановления (например, дающие при разложении CO_2).

Экспериментально-методическая часть

Основные задачи экспериментальной части

Проблемы, которые необходимо решить при создании стекол калиевоалюмооборотной матрицы с кристаллами CuCl :

- выбор восстановителя, обеспечивающего «мягкие» условия получения меди в виде Cu^+ в расплаве;
- выбор состава расплава, обеспечивающего «выпадение» жидкой фазы с компонентами кристалла, при термообработке стекла после варки;
- оптимизация температур и режимов термообработки, для получения кристаллов оптимальных размеров с необходимыми нелинейно-оптическими свойствами;
- обеспечение химической устойчивости стекла;
- проведение климатических испытаний стекол.

Все эти задачи необходимо решать в комплексе, так как, например, выбор состава расплава сам по себе влияет на его редокс-потенциал, не говоря уже о температуре стеклования и, соответственно, режиме термообработки, а также химической устойчивости.

Для обнаружения кристаллов CuCl в стекле планировалось применять методы измерения оптического поглощения, рентгеновского анализа и собственно измерение нелинейных оптических свойств. Для определения температуры стеклования использовался метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Для контроля устойчивости к атмосферным воздействиям (температура и влажность) – климатическая камера с обеспечением температур охлаждения-нагрева образца от -40 до $+40$ °С с возможностью варьирования влажности воздуха от 0 до 100 %.

Составы стекол

В данном проекте эксперименты проводились с калиевоалюмооборотной матрицей. Остановимся подробнее на роли компонентов стекла. Бор – это стеклообразователь, а алюминий повышает химическую устойчивость стекла. Калий снижает температуру варки, что является ключевым фактором для представленной матрицы. Она на 100 °С ниже температур варки силикатных стекол для тех же целей. Cu_2O отвечает за ввод одновалентной меди в расплав, NaCl – за ввод Cl , а натрия также, как и калий, снижает температуру варки (конечно, хлор можно было бы вводить и через другие соединения, однако это может быть или небезопасно или сложно ввиду их дефицита), SnO_2 и Sb_2O_3 – это так называемый «восстановительный буфер». Эти два элемента – сурьма и олово – легко меняют свое координатное число при изменении редокс-потенциала системы, что ведет к выделению или поглощению кислорода. При изменении редокс-потенциала в сторону окисления сурьма и олово образуют соединения, нуждающиеся в кислороде, в сторону восстановления – создают условия для его выделения. При этом система становится более инертной к внешним воздействиям: колебаниям температуры и локальным неоднородностям в расплаве. Все остальные компоненты в стекле играли, как правило, роль восстановителей и варьировались от варки к варке.

Химическая устойчивость

В ходе работы было сварено 55 составов стекол. Температура варок – 1300 °С. При добавлении ряда восстановителей было принято решение повысить температуру до 1400 °С. Варки проводились в корундизовых тиглях.

Начальные составы стекол были химически неустойчивыми – спустя несколько дней (а иногда и часов) после полировки их поверхность покрывалась налетом. В связи с этим молярное содержание оксида алюминия в шихте было повышено с 10 % до 25 %. Химическая устойчивость была достигнута. Стекла испытали в климатической камере при температурах от -40 до +60 °С и влажностях от 0 до 100 % (0, 50 % и 100 % влажности). Спектры исходных и испытываемых образцов совпали.

Оптимизация восстановителя

Для получения компонентов кристаллов CuCl в стекле, как упомянуто выше, нужно создать в расплаве мягкие восстановительные условия. Для этого в состав шихты вводились различные восстановители. В работе были использованы: Na₃AlF₆ (криолит), C₆H₅OH (сахар), бурление мокрой осиновой чуркой, NH₄H₂PO₄ (дигидрофосфат аммония). Помимо создания восстановительных условий, фтор, вводимый криолитом, должен был способствовать образованию центров кристаллизации. В результате, как показал спектр поглощения полученных стекол, оптимальным для дальнейшей инициации выделения фазы CuCl является ввод в состав стекла дигидрофосфата аммония. В итоге был получен оптимальный состав стекла (в дальнейшем СОС), приведенный в Табл. 1. Добавки указаны сверх 100 %.

Таблица 1

Состав стекла, оптимальный для получения фазы CuCl

Компоненты	Молярные %	Состав шихты, граммы, на 100 грамм варки
K ₂ O	20	33.45(K ₂ CO ₃)
Al ₂ O ₃	25	30.84
B ₂ O ₃	55	82.38(H ₃ BO ₃)
Cu ₂ O		5
NaCl		7.5
SnO ₂		0.5
Sb ₂ O ₃		1
Na ₃ AlF ₆		2.5
NH ₄ H ₂ P O ₄		10

Спектр поглощения стекол серии 14.
Режим термообработки - 412 градусов в течение 10 часов

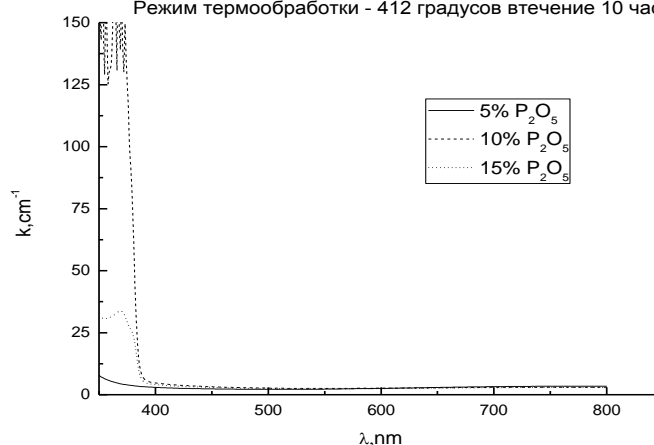


Рис. 2. Оптимизация концентрации восстановителя

Оптическое поглощение, соответствующее концентрации кристаллов хлорида меди в стекле после термообработки для разных концентраций вводимого восстановителя показано на рис. 2. Максимальная концентрация кристаллов после термообработки наблюдается при 10 г восстановителя на 100 г варки.

Режимы термообработки

Как известно, область роста размера кристаллов находится всегда выше по шкале температур, чем область роста количества зародышей. Поэтому необходимо выяснить:

- максимальные температуры термообработки, при которых стекло не теряет своих оптических свойств;
- оптимальные температуры термообработки, при которых будет минимальным рост самих кристаллов и максимальным рост количества их зародышей.

Максимальные температуры термообработки находились опытным путем. Для этого образцы стекла с полностью совпадающей с СОС матрицей были подвергнуты термообработке в интервале температур от 400 до 500 °С с шагом в 10 °С. Температура в 400 °С была выбрана в качестве нижней границы, так как она близка к температуре размягчения данного стекла, что подтверждено измерениями по дифференциальному термическому анализу со скоростью 10 °С в минуту.

В результате была получена температура в 422 °С, при которой данное стекло еще не теряет своих оптических свойств. При температуре в 434 °С стекло уже мутнело. Поэтому образцы СОС были обработаны при температурах в 422 °С и на 10 °С меньше. Измерения также показали, что температура стеклования (а соответственно, и температура «помутнения» стекла) при добавке фосфатов ниже, чем у матрицы стекла.

Как видно из рис. 3, поглощение в области экситона CuCl (384–365 нм) выше при температуре термообработки 412 °С, чем при температуре в 422 °С. Это можно объяснить тем, что кристалл начинает растворяться матрицей стекла при более высоких температурах.

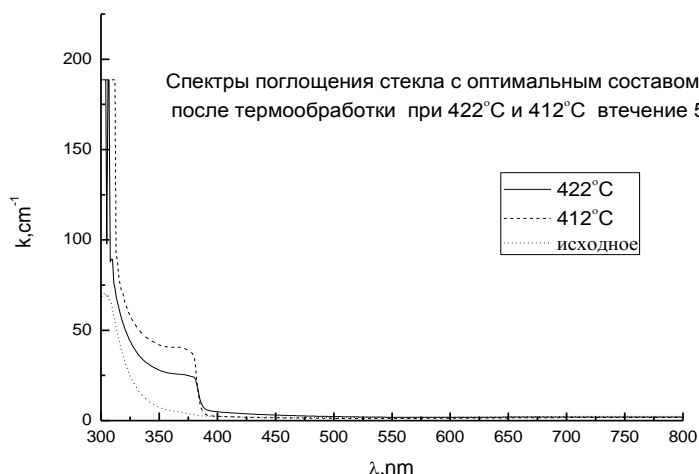


Рис. 3. Спектр поглощения СОС при различных температурах термообработки. Характерная «ступенька» в спектре есть не что иное, как полоса поглощения экситона CuCl

Проверка на наличие фотохромных свойств

Проведена проверка воздействия УФ-излучения на спектр СОС. В связи с этим тонкий образец данного стекла (термообработка 412 °С в течение 10 ч.) облучался ультрафиолетовой лампой в течение 30 мин. Полученные спектры поглощения представлены на рис. 4.

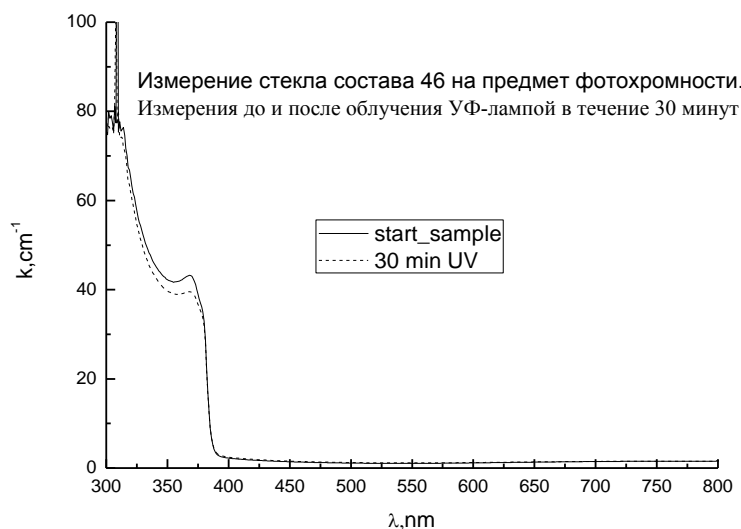


Рис. 4. Спектр СОС до и после облучения ультрафиолетом

Как видно, спектр практически не изменяется, то есть фотохромизмом данное стекло не обладает.

Нелинейно-оптические свойства полученного стекла

В качестве источника излучения в экспериментах использовался одномодовый YAG:Nd-лазер (SOLAR 512) с длинами волн генерации 1064 и 532 нм, длительностью лазерного импульса 5 нс и диаметром пучка 2 мм. Исследования проводились в сфокусированном пучке – образец помещался в фокальную плоскость телескопа с фокусным расстоянием 27 мм. Перед фотоприемником размещалась диафрагма диаметром 2 мм. Схема измерительной установки приведена на рис. 5.

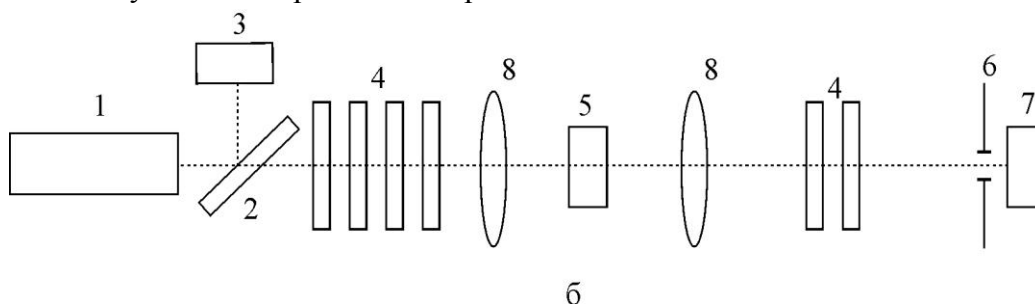


Рис. 5. Схема измерительной установки. 1 – лазер, 2 – зеркало, 3 – фотоприемник входного сигнала, 4 – кассета ослабляющих фильтров, 5 – образец, 6 – диафрагма, 7 – фотоприемник выходного сигнала, 8 – линзы

Эксперименты показали, что нелинейно-оптический отклик образцов проявляется в ограничении излучения. Эффект носит обратимый характер. Для $\lambda = 532$ нм наблюдаются две области плотностей энергии ограничения излучения. Слабо выраженный эффект ограничения соответствует плотностям энергии падающего излучения от 10^{-9} Дж/см². Он может быть связан с самодефокусировкой излучения при однофотонной генерации носителей заряда с глубоких

примесных уровней нанокристаллов CuCl. Результатом данного процесса является изменение эффективного показателя преломления стекла в области лазерного пучка и формирование отрицательной динамической линзы. По мере увеличения плотности энергии падающего излучения в данный процесс могут вносить вклад каскадные переходы с участием двух фотонов.

Сильно выраженный эффект ограничения при плотности энергии в 10^{-4} Дж/см² может быть связан с несколькими процессами, протекающими одновременно: двухфотонным поглощением, образованием отрицательной динамической тепловой линзы и фотогенерацией нестабильных центров окраски в нанокристаллах CuCl.

Результаты рентгеноструктурного анализа

Температуры плавления наночастиц в полученном композите были установлены с помощью измерений рентгеновского малоуглового рассеяния при различных температурах. На рис. 6 видно, что на участке 1 до температур 170 °С происходит плавление частиц первого типа, а на участке 3 – второго. При охлаждении частицы первого типа кристаллизуются при температуре в 130 °С, а второго – при температуре в 60 °С.

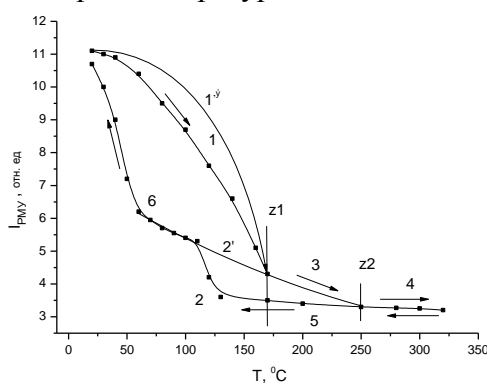


Рис. 6 Измерения зависимости рентгеновского малоуглового рассеяния от температуры для СОС

Размеры наночастиц были установлены с помощью рентгенофазового анализа. Они составили 13 нм

Оценка и обобщение результатов

Требуют детального объяснения следующие результаты исследования:

- отсутствие фотохромизма;
- изменения состояния системы, происходящие, как показывает рентгенофазовый анализ, при низких температурах в 130 и 60 °С, что не совсем объяснимо для стекла с температурой стеклования в 380 °С и температурой выделения кристаллической фазы в 412 °С.

Отсутствие фотохромизма можно объяснить отсутствием протекания реакции диспропорционирования, при которой кристаллы хлорида меди сенсibiliзируются [7]. В данной работе температуры термообработок стекла ниже тех, при которых эта реакция протекает.

Данные рентгенофазового анализа можно объяснить наличием в стеклах эвтектики CuCl-KCl, а не чистых кристаллов хлорида меди. При 130 °С эвтектика CuCl-KCl (температура ее кристаллизации – 150 °С) находится в переохлажденном, но жидком состоянии и в непосредственном соприкосновении с окружающим ее объемом стекла и выделившимися кристаллами CuCl. При этой температуре в результате термического сжатия происходит отрыв жидкости от поверхности «поры», в которой она находится (скачок плотности). При 60 °С –

полная кристаллизация. При нагреве же наличие двух точек плавления может быть связано именно с эвтектическими кристаллами CuCl и KCl.

Заключение

В результате исследования была создана новая наностеклокерамика с наночастицами CuCl, обладающая низкопороговыми нелинейно-оптическими свойствами, высоким поглощением в ультрафиолетовой области спектра и не обладающая фотохромизмом.

Поглощение в ближнем ультрафиолетовом диапазоне составляет до 150 см^{-1} , пороговая плотность излучения, инициирующая нелинейно-оптические эффекты – 10^{-9} Дж/см^2 , эксплуатационные условия – температуры от -40 до $+60$ °С.

Область применения – фильтры защиты органов зрения от ультрафиолетового излучения для охотников, альпинистов, наблюдателей, а также фильтры защиты для фотоприемников и органов зрения от лазерного излучения видимого диапазона.

Получена новая информация о физико-химических свойствах калиевоалюмооборатных наностеклокерамик.

Результаты работы могут быть использованы для организации производства на территории России класса очков и фильтров для широких слоев населения, ведущих активный образ жизни или по долгу службы вынужденных организовывать наблюдения на природе.

Публикации

1. Ким А.А., Ширшнев П.С. Нелинейно-оптические эффекты в калиево-алюмооборатном стекле с наночастицами хлорида меди // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 3 (67). С. 127.
2. Ким А.А., Ширшнев П.С., Сидоров А.И., Никоноров Н.В., Цехомский В.А. Нелинейно-оптические эффекты в стеклах с нанокристаллами хлорида меди // Письма в Журнал технической физики. 2011. № 8 (37). С. 22–28.
3. Ким А.А., Ширшнев П.С., Сидоров А.И., Никоноров Н.В. Нелинейно-оптический отклик калиево-алюмооборатных стекол с нанокристаллами галогенидов меди // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 3 (73). С. 26–28.
4. Никоноров Н.В., Цехомский В.А., Ширшнев П.С. Особенности синтеза стекол с нанокристаллами хлорида меди // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5 (75). С. 23–26.
5. Бабкина А.Н., Ким А.А., Никоноров Н.В., Цехомский В.А., Ширшнев П.С. Исследование оптического поглощения стекол, содержащих нанокристаллы CuBr, в широком температурном интервале // Сб. тезисов Международного симпозиума «Нанопотоника-2011». Кацивели, 2011. С. 71.
6. Golubkov V.V., Kim A.A., Nikonorov N.V., Tsekhomskii V.A., Shirshnev P.S. The precipitation of nanosized crystals CuBr and CuCl in potassium aluminoborate glasses // Glass physics and chemistry. 2012. Vol. 38. № 3. P. 259–268.
7. Никоноров Н.В., Цехомский В.А., Ширшнев П.С. Стеклокристаллический оптический материал с резкой границей поглощения в УФ-области спектра и способ его получения. Патент, заявка 210150803, решение о выдаче патента от 04.05.2012.

Литература

1. Finlayson N., Banyai W.C., Seaton C.T. Optical nonlinearities in $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ -doped glass waveguides // Journal of the optical society of America B. 1989. Vol. 6. № 4. P. 675–684.
2. Ohtsuka S., Koyama T., Tsunetomo K. Nonlinear optical property of CdTe microcrystalites-doped glasses fabricated by laser evaporation method // Applied physics letters. 1992. Vol. 61. № 25. P. 2953–2954.
3. Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. М., 1976. – 431 с.
4. Bus'ko I.Zh., Golubkov V.V., Vasil'ev M.I., Pshenitsina V.V., Tsekhomskii V.A. Homogeneous and heterogeneous crystallization in nanometer-sized regions of the copper halide phase in photochromic glasses // Glass physics and chemistry. 2002. Vol. 28. № 3. P. 124–134.
5. Dotsenko A.V., Glebov L.B., Tsekomsky V.A. Physics and chemistry of photochromic glasses. New York, 1998. – 308 p.
6. Остросаблина А.А., Сидоров А.И. Нелинейно-оптические свойства толстых композитных сред с наночастицами диоксида ванадия. I. Самодефокусировка излучения видимого и ближнего ИК диапазона // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 7. С. 36–41.
7. Корнилова Э.Е. Ферромагнитные и магнитооптические стекла в $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ системе: Дис. ... канд. ф.-м. наук. Л., 1984. – 159 с.
8. Tipton C.R. Reactor handbook materials. New York, 1960. – 405 p.

Сборник трудов аспирантов НИУ ИТМО, победителей конкурса грантов
Правительства Санкт-Петербурга / Под ред. проф. В.О. Никифорова. – СПб.:
НИУ ИТМО, 2013. – 221 с.

СБОРНИК ТРУДОВ АСПИРАНТОВ НИУ ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ
ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Под редакцией проф. В.О. Никифорова

Дизайн обложки А.А. Кушнарченко

Редакторы

А.В. Бутина, И.А. Лапшина

Лицензия ИД № 00408 от 5.11.1999

Подписано в печать 18.03.2013

Заказ 2973 Тираж 100 экз.

ISBN 978-5-7577-0424-1