

На правах рукописи



ИНОЧКИН Федор Михайлович

**ИЗМЕРЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЪЕКТОВ ПО ОПТИЧЕСКИМ
ИЗОБРАЖЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ ДИФРАКЦИОННОГО РАЗМЫТИЯ**

Специальность: 05.11.16 - Информационно-измерительные и управляющие
системы (машиностроение)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Круглов Сергей Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Гуревич Борис Симхович
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский электротехнический институт (ЛЭТИ)», главный научный сотрудник

кандидат технических наук,
Леонов Михаил Борисович
филиал акционерного общества «Корпорация космических систем специального назначения «Комета» - «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Акционерное общество «Научно-исследовательский институт телевидения»**

Защита диссертации состоится «20» июня 2019 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 при ФГАОУ ВО «СПбПУ» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 21, 9 учебный корпус (институт компьютерных наук и технологий), ауд.121.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «17» мая 2019 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах просим направить по адресу 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 21, 9 учебный корпус (институт компьютерных наук и технологий), ауд. 525, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.229.10 Богач Наталье Владимировне.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Богач Наталья Владимировна

ИЗМЕРЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЪЕКТОВ ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ ДИФРАКЦИОННОГО РАЗМЫТИЯ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В связи с прогрессом в технологии твердотельных матричных фотоприемников изображений и аппаратных средств цифровой обработки изображений, оптические методы измерения геометрических параметров объектов находят все более широкое применение в широком спектре задач фундаментального и прикладного характера: исследование деформаций конструкций и материалов в различных условиях их эксплуатации, промышленный контроль и управление производством, автономная пространственная навигация, медицинская диагностика, дистанционное зондирование Земли, микробиологические исследования. К преимуществам оптических методов измерения относят бесконтактность, монолитность конструкции измерительной системы, отсутствие подвижных частей системы, возможность дистанционных измерений.

Одной из проблем, возникающих при применении оптических методов для измерения геометрии объектов, является ограниченная разрешающая способность оптических систем, проявляющаяся в виде дифракционного размытия изображений. Дифракционное размытие является неотъемлемым свойством традиционных оптических систем и характеризуется снижением амплитудно-частотной характеристики изображений в области высоких частот, достигая полного затухания пространственно-частотного спектра изображения свыше некоторой предельной (для данной системы) частоты. Следствием дифракционного размытия является необратимая потеря высокочастотной информации о наблюдаемом объекте, что проявляется в виде сглаживания наблюдаемых малоразмерных деталей границ объектов, вплоть до неразрешимости таких деталей границ на изображении.

На сегодняшний день данная проблема наиболее актуальная для тех приложений измерительных систем, где требуется большое увеличение изображения: микробиологические исследования, измерение микродеформаций материалов и конструкций, производство микроэлектронных изделий, идентификация и измерение параметров космических объектов. При этом в связи с тенденцией к миниатюризации фотоприемных матриц (снижении размеров растровых элементов при увеличении их числа), с течением времени, вероятно, следует ожидать увеличения роли проблемы дифракционного размытия во все более широком круге задач – в том числе и в тех приложениях, где в настоящее время ограничивающим фактором разрешающей способности системы является частота пространственной дискретизации изображений.

Алгоритмические и математические основы методов обнаружения и измерения (оценки) положения элементов границ объектов по цифровым изображениям были заложены еще на рубеже 1960х-1970х гг. в работах А. Розенфельда, Л. Робертса, Дж. Прюитта, И. Собеля. Эти классические работы положили начало широкому спектру исследований и разработок, направленных

на повышение надежности и точности алгоритмов обнаружения и оценки границ. Так, за прошедшие годы были разработаны отличающиеся высокой устойчивостью к шуму при обеспечении высокой субпиксельной точности методы на основе интегральных моментов изображения (E. P. Lyvers, A. J. Tabatabai, O. Mitchell, Ghosal S., Mehrotra R., Bin T. J., Trujillo-pino A., Krissian K.), специализированные методы для высокоточных измерений положения границ по размытым изображениям на основе аппроксимации регистрируемого сигнала гладкими функциями (Rocket P., Fabijanska A., Bailey D. G., Heidingsfelder P., Chen P., Sun Q., Nalwa V., Binford T.O., Hagara M.), а также отличающиеся высокой устойчивостью к неравномерности яркости методы активных контуров (Kass M., Witkin A., Terzopoulos D., Chan T., Vese L., Михайличенко А.А., Демяненко Я.М., Петров В.О., Привалов О.О., Чернухин Н.А., Мурашов Д.М., Семашко А.С., Крылов А.С., Родин А.С.).

Независимо от указанных методов и алгоритмов, в прошедшие годы также осуществлялось бурное развитие методов компенсации размытия (деконволюции) изображений. Для решения этой проблемы на сегодняшний день активно применяются классический метод фильтрации Винера, итерационный нелинейный метод Люси-Ричардсона, методы на основе эффективных оптимизационных стратегий восстановления изображения. Следует отметить, что с учетом необратимости дифракционного размытия, данная задача наиболее эффективно решается с привлечением методов регуляризации, рассматриваемых как отечественными (Васин В.В., Сержникова Т.И., Сизиков В.С., Малыхин В. М., Малыхина Г.Ф., Меркушева А. В.), так и зарубежными учеными. Существенный глобальный вклад в данном направлении внесли ставшие классическими работы по решению некорректных задач Тихонова А.Н., Арсенина В.Я.

Для непосредственного извлечения информации об объекте, утерянной вследствие дифракционного ограничения разрешающей способности оптических систем, в последние 20 лет было разработано и реализовано несколько эффективных методов оптического сверхразрешения: структурированное освещение (Gustaffson M. G.), фурье-птихография (G. Zheng, R. Horstmeyer, S. Yang), семейство методов на основе нелинейных эффектов флуоресценции (S. W. Hell, J. Wichmann, M. J. Rust, M. Bates, X. Zhuang). Указанные методы на практике достигают многократного (более 4-х крат) повышения разрешающей способности оптических систем.

Однако, на сегодняшний день проблема обработки дифракционно-размытых изображений в прикладном аспекте измерения границ объектов представляется проработанной в недостаточной степени. Так, большинство исследований в области высокоточных методов и алгоритмов измерения границ ориентировано скорее на проблему пониженной частоты пространственной дискретизации, а не на проблему недостаточного оптического разрешения. При этом известные специализированные методы оценки координат граничных точек для размытых изображений, как правило, ограничены одномерными моделями обрабатываемых сигналов и, таким образом, не позволяют скомпенсировать

сглаживающее влияния размытия на двумерный контур границы объекта. Методы восстановления размытых изображений, являясь признанным и эффективным инструментом для повышения их визуальной четкости, не учитывают в полной мере специфику измерительных задач и ту априорную информацию об объекте измерения, которая может быть введена в достаточно широком классе прикладных измерительных систем. Что касается методов оптического сверхразрешения, то они требуют создания весьма специфичных условий освещения наблюдаемого объекта, не позволяя работать в «пассивном» режиме, а также значительно усложняя аппаратную часть измерительной системы и снижая при этом её быстродействие.

Таким образом, тема диссертационного исследования – измерение границ объектов по оптическим изображениям в условиях дифракционного размытия – **является актуальной.**

Основная идея диссертационного исследования заключается в том, чтобы решать задачи оценки границ и компенсации размытия совместно, путем аппроксимации регистрируемого камерой изображения изображением, моделируемым численно. Таким образом, компенсация размытия изображения будет осуществляться с учетом априорной информации о наличии четкой границы объекта в анализируемой области изображения – что следует из самой постановки задачи. В то же время, оценка границы объекта будет выполняться с учетом влияния размытия изображения на оцениваемый контур границы. Следовательно, основная гипотеза работы заключается в том, что совместное решение задач компенсации размытия изображения и оценки границ объектов позволяет получить более точное решение по сравнению с последовательным независимым решением указанных задач.

Цель работы – повышение точности оценивания границ объектов по оптическим изображениям в условиях дифракционного размытия путем аппроксимации регистрируемого камерой изображения изображением, моделируемым численно.

Актуальная научная задача – преодоление предела разрешающей способности оптических приборов и систем формирования изображений.

Для достижения цели требуется решить следующие задачи:

1. На основе анализа литературы по методам и алгоритмам оценки границ объектов определить факторы снижения точности оценивания.
2. Разработать математическую модель непрерывного изображения объекта с четкой границей, адекватную реальным оптическим изображениям.
3. Разработать алгоритм моделирования дискретного изображения объекта с четкой границей при заданных параметрах границы объекта (прямая задача).
4. Разработать алгоритм оценивания параметров границы объекта по заданному дискретному сигналу изображения (обратная задача).
5. Реализовать разработанные алгоритмы и провести исследование точности измерения границы для разрабатываемого и известных методов с учетом влияния выявленных в п.1 факторов снижения точности.

6. Провести исследование характеристик разработанного метода в приложении к реальной измерительной системе.

Объект исследования – методы и алгоритмы оценки контуров объектов по оптическим изображениям.

Предмет исследования – точность оценки контуров объектов в условиях дифракционного размытия изображений.

Методы исследования. Основные методы, использованные при проведении исследования – численная оптимизация, методы решения математически некорректных задач, методы цифровой обработки изображений. При сравнительном анализе разработанного и известных подходов использованы методы субпиксельной оценки контуров, деконволюции изображений, цифровой корреляции изображений. Исследование характеристик методов оценки контуров объектов осуществлялась путем проведения вычислительных экспериментов над численно смоделированными и натурными изображениями.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов определяется непротиворечивостью математических выкладок, результатами вычислительных экспериментов над натурными и смоделированными данными, экспериментальной проверкой программной реализации разработанных алгоритмов и моделей в прикладной задаче измерения параметров температурного расширения объектов оптическим методом.

Научная новизна результатов работы заключается в том, что предложен метод измерения границ объектов для размытых изображений на основе итерационного уточнения измеряемых координат граничных точек путем минимизации функционала невязки регистрируемого камерой изображения и изображения, моделируемого численно. При этом:

1. Предложен вычислительно-эффективный алгоритм субпиксельного численного моделирования изображения с финитным спектром для объектов с четкой замкнутой границей, основанный на аналитическом расчете фурье-образа ограничивающего объект многоугольника.
2. Предложен алгоритм решения обратной задачи (измерения координат граничных точек) на основе двухуровневой минимизации функционала невязки и обоснована эффективность предложенного алгоритма.
3. Разработана методика количественного исследования и получены новые результаты исследования точности оценки границ объектов различными алгоритмами в условиях дифракционного размытия.
4. Разработана методика применения предложенного метода оценки границ в прикладной задаче оптического измерения температурного коэффициента линейного расширения образцов твердых материалов.

На защиту выносятся следующие основные научные положения и результаты:

1. Метод оценки границ объектов, основанный на аппроксимации регистрируемого камерой изображения изображением, моделируемым численно.

2. Алгоритм моделирования изображения с финитным спектром для объекта с четкой границей на основе частично аналитического расчета дискретного фурье-образа ограничивающего объект многоугольника (прямая задача).
3. Алгоритм оценки координат граничных точек, основанный на двухуровневой численной минимизации функционала невязки регистрируемого и моделируемого изображений (обратная задача).
4. Результаты исследования точности оценивания границ в условиях влияния дифракционного размытия изображений.
5. Методика повышения точности измерений с помощью разработанного метода в прикладной задаче бесконтактного измерения температурного коэффициента линейного расширения образцов твердых материалов.

Практическая ценность работы. Практически значимыми результатами работы являются:

1. Программная реализация предложенного вычислительно-эффективного алгоритма моделирования изображений на основе частично аналитического расчета дискретного фурье-образа ограничивающего объект многоугольника в виде последовательной программы, а также с использованием технологии параллельных вычислений OpenCL.
2. Программная реализация предложенного алгоритма оценки координат граничных точек.
3. Программное обеспечение оценки контуров объектов по оптическим изображениям, позволяющее применять предложенный метод и разработанные алгоритмы в интерактивном и пакетном режимах обработки.
4. Прикладное программное обеспечение обработки данных высокотемпературного дилатометра ДОВ-1 (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева), позволяющее измерять величину температурного удлинения образцов твердых материалов по оптическим изображениям краев исследуемых образцов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: 10-й, 12-й, 13-й 15-й Международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений» (г. Санкт-Петербург, 2013, 2015, 2016 и 2018), 5-й Всероссийской и стран КОOMET конференции по проблемам термометрии «Температура-2015» (г. Санкт-Петербург, 2015), международной конференции «IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference ElConRus» (г. Санкт-Петербург, 2016 и 2017), 20-й и 21-й Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (г. Санкт-Петербург, 2017 и 2018), международном симпозиуме «SPIE Optical Metrology» (г. Мюнхен, 2017), 25-й Международной конференции «IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)» (г. Афины, 2018).

Реализация и внедрение результатов. Разработанные алгоритмы для выделения границ объектов на изображениях при обработке последовательности видеок кадров, в частности, алгоритм с регуляризацией оптимизационной задачи на основе гипотезы плавного контура объекта, а также компьютерные программы

для регистрации и обработки видеопоследовательностей использованы при проведении в 2018 г. научно-исследовательской работы «Разработка передовых технологий бесконтактного контроля объектов на основе регистрации и обработки последовательности видеок кадров» (тема 17613 по государственному заданию № 8.2501.2017/ПЧ от 31.05.2017 г.), выполняемой федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО).

Разработанное программное обеспечение применяется во всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) в лаборатории эталонов и научных исследований в области измерений теплового расширения. Программное обеспечение решает задачу измерения величины температурного расширения образцов твердых материалов по оптическим изображениям, получаемым на высокотемпературном dilatометре ДОВ-1 в диапазоне температур 1000..3000К. Dilатометр ДОВ-1 включен в состав государственного первичного эталона единицы температурного коэффициента линейного расширения в 2014 г., разработанное программное обеспечение внедрено в процессе модернизации dilatометра в 2015-2017 гг.

Личный вклад автора. Все научные положения и результаты диссертации, выдвигаемые автором для защиты, получены автором лично. Оптико-механическая часть экспериментальной базы для исследований подготовлена совместно с Бронштейном И. Г. Постановка задачи измерения параметров температурного расширения выполнена совместно с д.т.н. Компан Т. А. Исходные экспериментальные данные высокотемпературного dilatометра ДОВ-1, а также стенд для калибровки импульсного отклика оптической системы dilatометра подготовлены совместно с сотрудниками ВНИИМ Кондратьевым С. В., Пуховым Н. Ф., Корневым А. С.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, из которых 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК (из которых 2 статьи в переводном журнале с индексацией в Scopus), 1 статья в научном журнале Scopus/WoS, 1 патент на изобретение, тезисы и статьи в сборниках 11 докладов международных и всероссийских конференций (из которых 1 статья на двух языках).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 205 страниц печатного текста, 58 рисунков, 5 таблиц, список используемой литературы из 125 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, определен объект исследований, сформулированы цель и задачи, положения и результаты,

выдвигаемые для защиты, показаны практическая значимость, апробация и результаты внедрения диссертации.

Первая глава диссертации посвящена современному состоянию проблемы измерения границ объектов по оптическим изображениям. Глава содержит три основных раздела: аппаратное обеспечение оптико-электронных измерительных систем, методы оценивания границ объектов по оптическим изображениям, факторы снижения точности измерений границ объектов. В первом разделе кратко рассмотрены принципы построения и современная элементная база аппаратных средств систем формирования изображений, при этом уделено внимание методам управления датчиками изображений для измерительных систем. Во втором разделе приведен обзор литературы по методам и алгоритмам обнаружения и оценки границ объектов. Выделены методы приближенного и субпиксельного оценивания границ, рассмотрены представители интерполяционных методов, методов моментов, аппроксимационных и комбинационных методов. Отмечена перспективность развития идеи аппроксимационных методов оценивания границ для повышения точности измерений границ на размытых изображениях. В третьем разделе описаны основные факторы, снижающие точность измерения границ объектов: дифракционное размытие изображения, aberrации оптической системы, недостаточная частота пространственной дискретизации изображения, неравномерность яркости объекта или фона. Отмечена сложность проблемы измерения границ при дифракционном размытии, обусловленная полным затуханием высокочастотных компонент фурье-образа изображения (рис. 1).

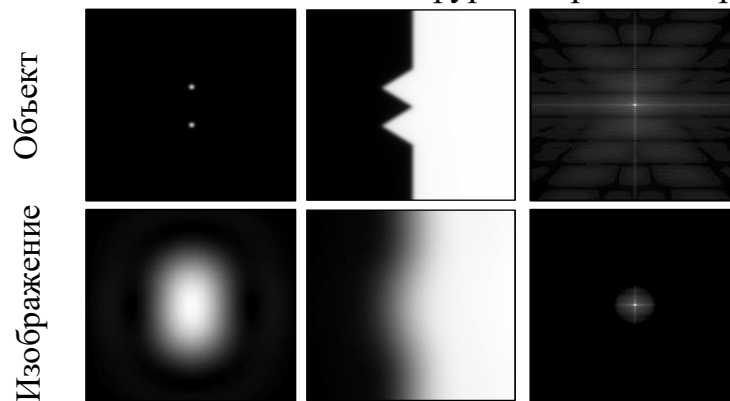


Рис. 1 Пример влияния дифракционного размытия на оценку границы объекта: слева – пара точечных источников, по центру – объект и его изображение, справа – модуль фурье-образа объекта и его изображения

Рассмотрены методы оптического сверхразрешения, позволяющие частично восстановить высокочастотные компоненты фурье-образа объекта с помощью специальным образом контролируемого освещения.

Вторая глава диссертации посвящена разработанному автором аппроксимационному методу оценивания границ для размытых изображений. В отличие от ранее известных аппроксимационных методов, основанных на моделях одномерных сигналов, разработанный метод основан на модели двумерного распределения яркости изображения. Для этого предлагается

аппроксимировать формируемое оптической системой непрерывное изображение следующей моделью:

$$I(x, y) = [I_{OB}(x, y)M(x, y) + I_{BG}(x, y)(1 - M(x, y))] * h(x, y), \quad (1)$$

где I – яркость изображения, (x, y) – декартовы координаты точки изображения, h – двумерный импульсный отклик оптической системы, функция $M(x, y)$ – бинарный индикатор принадлежности точки (x, y) ограничивающей объект фигуре (предложено назвать эту функцию бинарной маской объекта), I_{OB} и I_{BG} – распределения яркости объекта и фона соответственно, «*» – оператор свертки. Графическая интерпретация модели (1) приведена на рис. 2.

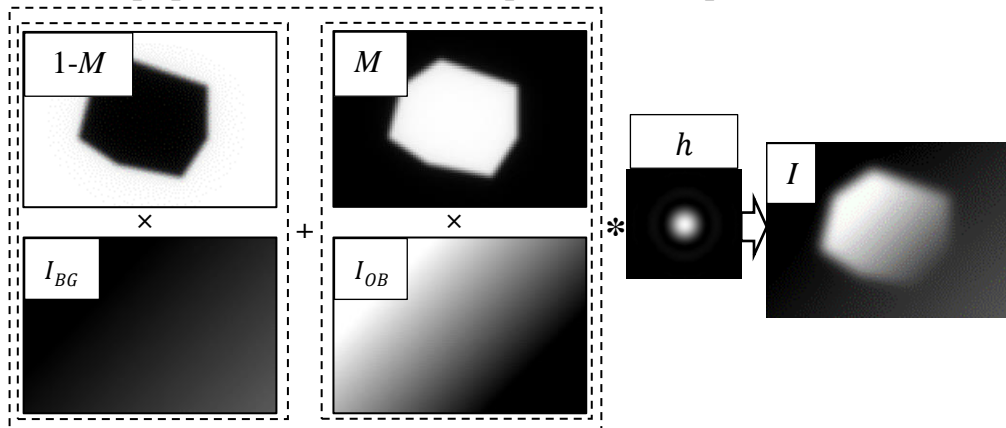


Рис. 2 Графическая интерпретация математической модели непрерывного изображения

Для построения алгоритмической реализации предложенного метода потребовалось:

1. определить вектор параметров математической модели изображения, задав при этом способы представлений распределений яркости объекта и фона;
2. разработать алгоритм вычисления дискретного изображения по заданному вектору параметров модели (прямая задача);
3. разработать алгоритм оценки параметров математической модели изображения по заданному дискретному изображению (обратная задача).

Моделирование распределений яркости объекта и фона. В диссертационной работе рассмотрено две модели распределений яркости. Первая модель основана на представлении распределений яркости в виде линейной комбинации полиномов, определенных на декартовой плоскости, при этом вектор параметров модели состоит из коэффициентов при полиномах (предложено называть такую модель полиномиальной). Вторая модель основана на представлении распределения яркости в виде свертки матрицы отсчетов яркости с импульсным откликом, определяемым априорными сведениями о пространственно-частотных характеристиках текстуры объекта или фона, при этом вектор параметров модели состоит из отсчетов матриц яркости объекта и фона (предложено называть такую модель сверточной). Предварительные эксперименты показали, что для реальных изображений достаточно трудно сформировать адекватный полиномиальный базис, и на практике предпочтительно использование сверточной модели. Полиномиальная модель

использовалась в работе при моделировании тестовых изображений для вычислительных экспериментов.

Алгоритм вычисления модели дискретного изображения (прямая задача). С учетом предложенной модели непрерывного изображения (1), отсчеты дискретного изображения могут быть представлены выражением:

$$\mathbf{I}[i, j] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [I_{OB}(x, y)M(x, y) + I_{BG}(x, y)(1 - M(x, y))] \bar{h}(x_j - x, y_i - y) dx dy, \quad (2)$$

где \mathbf{I} – матрица дискретного изображения, (i, j) – индексы пикселя по вертикали и горизонтали соответственно, (x_j, y_i) – координаты центра пикселя с индексами (i, j) в плоскости изображения, \bar{h} – комбинированный импульсный отклик системы (свертка импульсных откликов оптической системы и датчика изображения). Поскольку аналитическое решение (2) возможно лишь для частных случаев, в диссертационной исследовании рассматриваются численные методы моделирования изображений.

Первый рассмотренный метод моделирования основан на аппроксимации (2) интегральной суммой, что является вычислительно неэффективным, но обеспечивает высокую гибкость в выборе моделей границы объекта и распределений яркости. Показано, что при допущении постоянства яркости объекта и фона в пределах пикселя изображения, объем вычислений может быть сокращен приблизительно на порядок.

Второй рассмотренный метод моделирования (вычислительно-эффективный) основан на свойстве финитности пространственно-частотного спектра изображений, обусловленного действием дифракционного размытия. Соответствующая математическая модель дискретного изображения (\mathbf{I}) при данном способе описывается выражением:

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= [\mathbf{I}_{OB} \cdot \mathbf{M} + \mathbf{I}_{BG} \cdot (\mathbf{U} - \mathbf{M})] * \mathbf{h}, \\ \mathbf{M} &= \mathbf{F}^{-1}(\downarrow F_M), \end{aligned} \quad (3)$$

где \mathbf{I}_{OB} и \mathbf{I}_{BG} – матрицы распределений яркости объекта и фона соответственно, \mathbf{U} – матрица, все элементы которой равны единице, \mathbf{M} – матрица дискретного частотно-ограниченного изображения бинарной маски объекта, произведение матриц – поэлементное, \mathbf{F}^{-1} – обратное дискретное преобразование Фурье, $\downarrow F_M$ – результат дискретизации фурье-образа непрерывной бинарной маски M , определенной в (1), произведение матриц – поэлементное. Основные этапы алгоритма вычисления модели изображения (3) приведены на рис. 3.

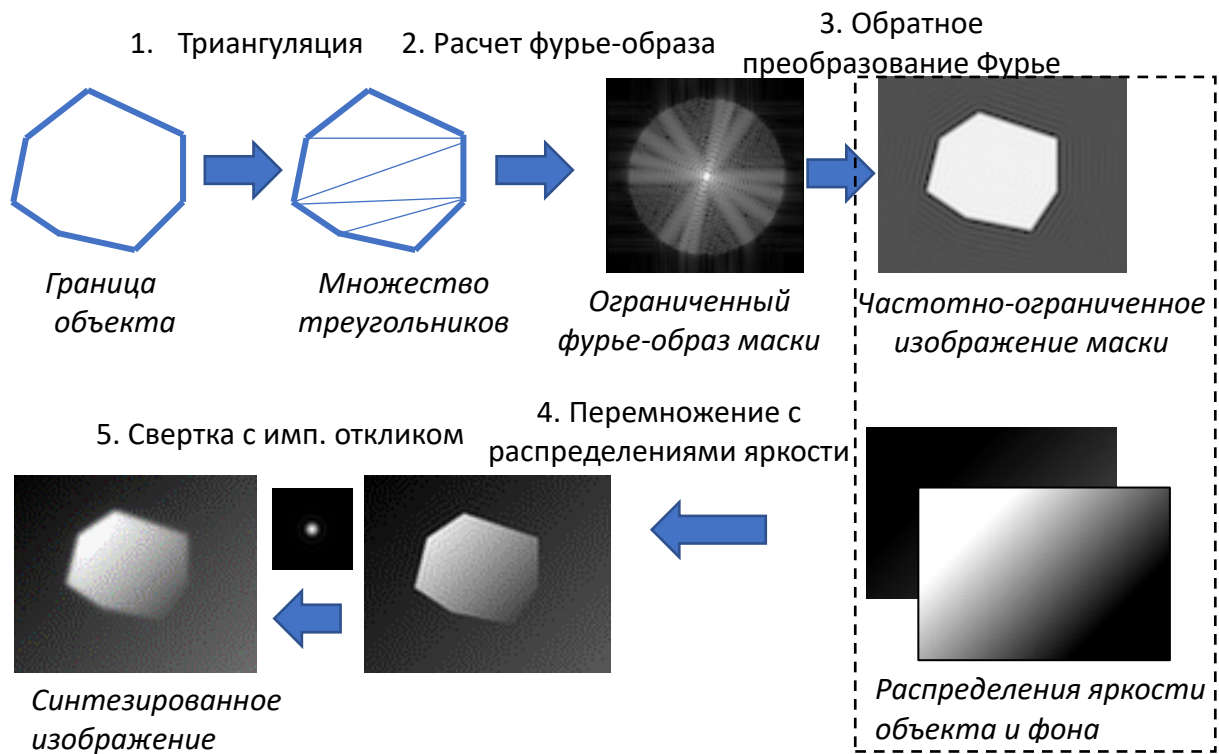


Рис. 3 Основные этапы вычислительно-эффективного алгоритма моделирования изображения в фурье-области

Вычислительная эффективность разработанного алгоритма при одновременном обеспечении высокой точности моделирования достигается путем разбиения ограничивающей объект фигуры на множество непересекающихся треугольников и последующего аналитического расчета фурье-образа каждого из полученных треугольников. Соответствующие аналитические выражения фурье-образа треугольника были получены в процессе исследования и представлены в работе. Пусть треугольник равномерной единичной яркости задан точками (ABC) , а пространственная частота искомого фурье-коэффициента задана в полярных координатах (ω, α) . Повернем треугольник относительно начала координат на угол α и обозначим точки повернутого треугольника $(A'B'C')$. Также определим точку (D') пересечения линии $(A'B')$ и линии, параллельной оси абсцисс, проходящей через точку C' . Обозначим абсциссы точек $(A'B'C'D')$ как (a, b, c, d) , а высоты треугольников $(A'B'D')$ и $(B'C'D')$ как h_A на h_C . В работе показано, что искомым фурье-коэффициент может быть вычислен как сумма $F=F_1+F_2$, где:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{h_A ([a-b]\exp(-i\omega d) + [b-d]\exp(-i\omega a) + [d-a]\exp(-i\omega b))}{\omega^2 (d-a)(a-b)}, & \omega^2 (d-a)(a-b) \neq 0, \\ \frac{h_A (\exp(-i\omega d) - \exp(-i\omega b) + [d-b]i\omega \exp(-i\omega b))}{\omega^2 (d-b)}, & \omega^2 (d-b) \neq 0, \\ \frac{h_A (b-d)}{2}, & \omega^2 (d-b) = 0, \end{cases}$$

а F_2 вычисляется аналогично путем замены a на c и h_A на h_C .

Теоретический анализ показывает, что разработанный эффективный алгоритм моделирования позволяет более чем на два порядка сократить объем вычислений по сравнению с известным алгоритмом моделирования на основе субпиксельной дискретизации изображения при шаге 10^{-2} пикселя. При этом вычислительная сложность разработанного алгоритма не зависит от чувствительности модели к изменениям координат точек границы объекта, поскольку количество вычисляемых в процессе моделирования изображения фурье-коэффициентов определяется лишь размерностью моделируемого изображения и предельной частотой изображения.

Алгоритм оценки параметров модели (обратная задача) основан на численной оптимизации функционала невязки моделируемого и регистрируемого изображений:

$$(\hat{\mathbf{X}}, \hat{\mathbf{Y}}, \hat{\mathbf{K}}_{OB}, \hat{\mathbf{K}}_{BG}) = \arg \min_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{K}_{OB}, \mathbf{K}_{BG}} (E) : E = \frac{1}{2} \sum_{(x,y) \in \mu} \mathbf{I}_D[x, y]^2, \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_D = \mathbf{I}_M \Big|_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{K}_{OB}, \mathbf{K}_{BG}} - \mathbf{I}_E,$$

где \mathbf{X} и \mathbf{Y} – искомые параметры границы (векторы значений абсцисс и ординат точек границы соответственно), \mathbf{K}_{OB} и \mathbf{K}_{BG} – матрицы параметров яркости объекта и фона соответственно, \mathbf{I}_M и \mathbf{I}_E – матрицы моделируемого и сформированного датчиком изображений соответственно, μ – анализируемая область пикселей изображения. Решение задачи (4) предлагается искать путем применения методов численной градиентной оптимизации. Для этого потребовалось определить способ вычисления частных производных оптимизируемого функционала (E) по параметрам математической модели дискретного изображения (3).

В работе получены аналитические выражения для вычисления частных производных по яркостным параметрам предложенной модели. При этом показано, что при представлении распределений яркости объекта и фона в виде свертки $\mathbf{I}_{OB} = \mathbf{K}_{OB} * \mathbf{Q}_{OB}$ и $\mathbf{I}_{BG} = \mathbf{K}_{BG} * \mathbf{Q}_{BG}$, где \mathbf{Q}_{OB} и \mathbf{Q}_{BG} – матрицы, определяемые априорными сведениями о пространственно-частотных характеристиках текстур объекта и фона, расчет частных производных по всем яркостным параметрам модели изображения может быть выполнен вычислительно-эффективно, а именно:

$$\frac{\partial E}{\partial (\mathbf{K}_{OB}[x, y])} = \left(\left[((\mathbf{I}_D \cdot \mathbf{C}) \circ \mathbf{h}) \cdot \mathbf{M} \right] * \mathbf{Q}_{OB} \right) [x, y],$$

где $\mathbf{C}[i, j] = \begin{cases} 1, & (i, j) \in \mu \\ 0, & (i, j) \notin \mu \end{cases}$, символ « \circ » обозначает дискретную корреляцию.

Аналогичное выражение получено для частных производных по параметрам яркости фона.

Частные производные по координатам точек границы предложено вычислять приближенно. Однако при этом удается достичь многократного уменьшения объема вычислений по сравнению с общими методами численного дифференцирования за счет учета структуры дифференцируемого функционала. Искомая производная вычисляется с помощью следующей аппроксимации (на примере абсциссы i -й точки):

$$\frac{\partial E}{\partial x_i} = \sum_{(x,y) \in \mu} \left(\mathbf{I}_D[x, y] \frac{\partial (\mathbf{I}_M[x, y])}{\partial x_i} \right),$$

$$\frac{\partial \mathbf{I}_M}{\partial x_i} = \left([\mathbf{I}_{OB} - \mathbf{I}_{BG}] \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x_i} \right) * \mathbf{h} \approx \frac{1}{\Delta x_i} ([\mathbf{I}_{OB} - \mathbf{I}_{BG}] \cdot \Delta \mathbf{M}) * \mathbf{h},$$

где $\Delta \mathbf{M}$ – изменение матрицы \mathbf{M} при изменении абсциссы i -й точки на Δx_i . В работе предложен алгоритм для быстрого вычисления указанной аппроксимации как результата взвешенного суммирования множества изображений импульсного отклика системы \mathbf{h} .

Предварительные вычислительные эксперименты показали, что непосредственное применение методов градиентной оптимизации для решения оптимизационной задачи (4) является малоэффективным. Вместо этого, следует провести декомпозицию задачи на два уровня, при этом оптимизацию по параметрам яркости следует выполнять на вложенном уровне, а по координатам точек границы – на внешнем уровне. Кроме того, установлено, что даже в отсутствии шума обратная задача (4) является математически некорректной. Для стабилизации решения в оптимизируемый функционал предложено внести стабилизирующее слагаемое, основанное на гипотезе плавности оцениваемого контура:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{(x,y) \in \mu} \mathbf{I}_D[x, y]^2 + \lambda \frac{1}{2} \sum_i \tan^2 \left(\frac{\pi - \alpha_i}{2} \right), \quad (5)$$

где λ – коэффициент регуляризации, α_i – угол между соседними отрезками границы i -й точки контура ($0 \leq \alpha_i \leq \pi$).

Третья глава диссертационного исследования посвящена исследованию точности оценивания границ объектов различными методами в условиях дифракционного размытия на численно смоделированных и натуральных изображениях. В качестве альтернатив разработанному методу двумерной аппроксимации (МДА) рассмотрены субпиксельные методы аппроксимации сигнала функцией ошибок (АСФО), аппроксимации производной функцией Гаусса (АПФГ), метод центра тяжести градиента (ЦТГ), метод ортогональных моментов Фурье-Меллина (ОМФМ), а также простая оценка пиксельного уровня («Пикс.»). Сравнение выполнялось как при непосредственном применении указанных методов к размытым изображениям, так и с предварительным восстановлением изображений методами Винера, Люси-Ричардсона, а также методом восстановления с регуляризацией на основе полной вариации восстанавливаемого сигнала («TV-регуляризация») – данный метод известен свойством хорошего восстановления резких границ объектов.

Для количественного сравнения точности оценки границы был введен количественный критерий (v), имеющий смысл среднеквадратического расстояния от точек оцениваемой границы до ближайших к ним отрезков эталонной границы, а именно:

$$v = \sqrt{\frac{1}{N_1 + N_2} \left(\sum_{i=1}^{N_1} d_1[i]^2 + \sum_{i=1}^{N_2} d_2[i]^2 \right)}, \quad \begin{aligned} d_1[i] &= \min_{j=0..N_2} \rho(P_1[i]; L_2[j]), \\ d_2[i] &= \min_{j=0..N_1} \rho(P_2[i]; L_1[j]), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\rho(P_q; L_q)$ – расстояние от точки P_q до отрезка L_q , N_1 и N_2 – количество точек оцениваемой и эталонной границ соответственно, P_1 и P_2 – множества точек оцениваемой и эталонной границ, L_1 и L_2 – множества отрезков, образованных путем соединения пар соседних точек границы для оцениваемой и эталонной границ соответственно. Для описания степени выраженности дифракционного размытия введен параметр относительной предельной частоты изображения Ψ_{\max} , определенный как отношение предельной частоты моделируемого импульсного отклика системы к половине частоты дискретизации.

Результаты вычислительных экспериментов по оценке точности измерения границ различными методами приведены на рис. 4. Указанные результаты получены для специального тест-объекта со сложным контуром границы (фрагмент изображения тест-объекта приведен на рис. 5, нижний ряд). Помимо исследования влияния дифракционного размытия, с помощью вычислительных экспериментов была проведена оценка устойчивости разработанного метода к влиянию шума и пониженной частоты дискретизации, неравномерности яркости объекта, а также отклонению модельного импульсного отклика системы от фактического. В результате исследования выявлено, что предложенная регуляризация (5) обеспечивает устойчивость метода к указанным факторам.

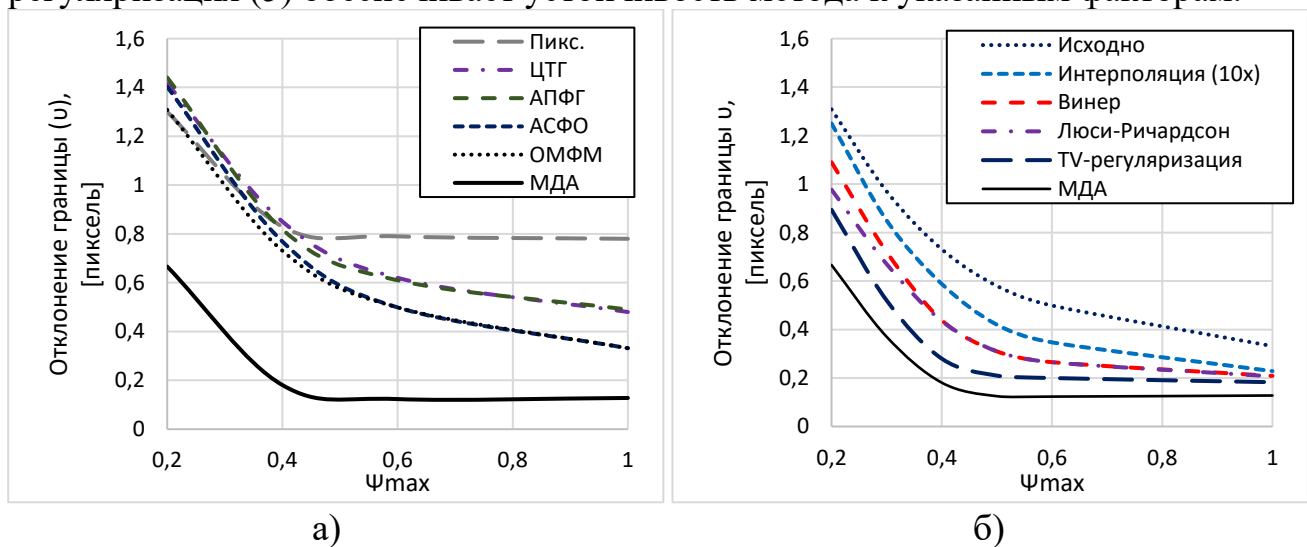


Рис. 4 Результаты исследования точности измерения границ по исходным (а) и предварительно восстановленным (б) изображениям (на примере тест-объекта с псевдослучайным контуром границы)

На рис. 5 приведены результаты работы рассмотренных в работе методов для натуральных изображений, полученных в результате специальных экспериментов.

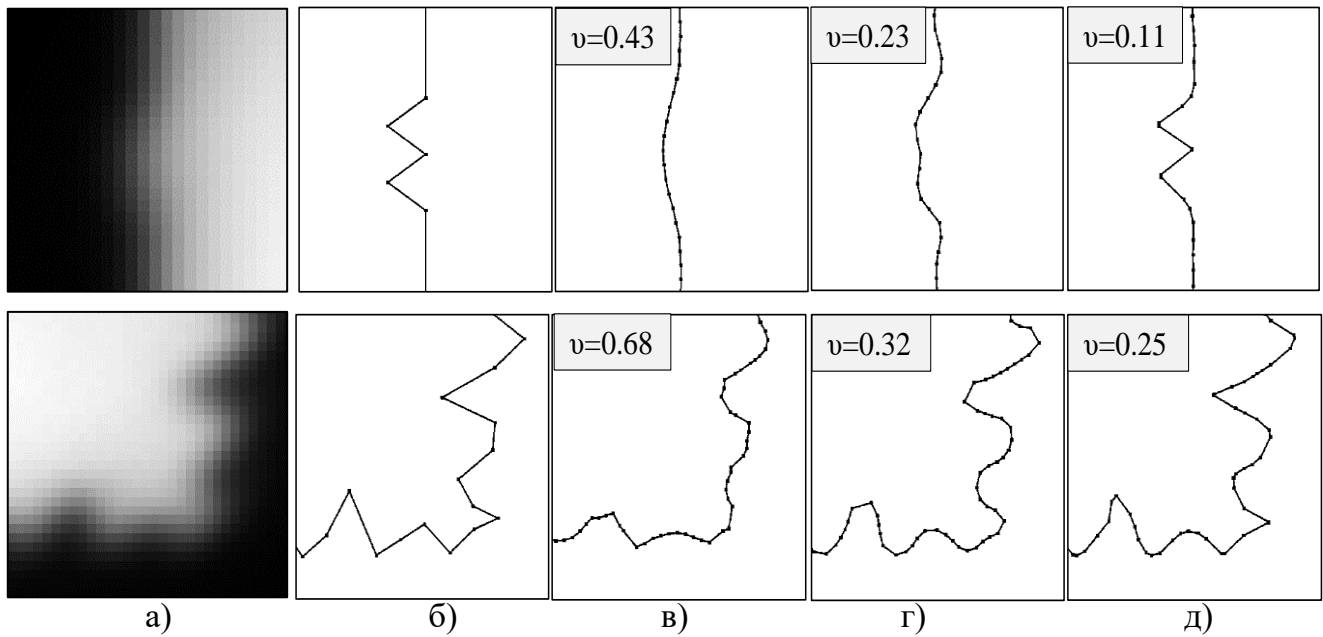


Рис. 5 Пример измерения границ по натурным изображениям: изображения (а), истинная граница (б), оценка границы известным методом по исходному изображению (в), известным методом по восстановленному изображению (г), разработанный метод двумерной аппроксимации (д)

Следует отметить, что разработанный метод наиболее эффективен для неразрешимых на изображении участков границы объекта (рис. 5, верхний ряд). При этом результаты специальных вычислительных экспериментов показывают, что существенное влияние на результат оказывает чувствительность модели изображения к изменениям координат точек границы, которая должна быть не хуже 0.005 пикселя, по крайней мере, при предложенном алгоритме решения оптимизационной задачи (4). Таким образом, применение разработанного эффективного алгоритма моделирования изображений на основе вычисления фурье-образа ограничивающего объект многоугольника является существенным фактором повышения точности оценки границ объектов при одновременном сокращении объема вычислений.

Четвертная глава диссертационного исследования посвящена практической реализации разработанного метода и его применению в реальной измерительной системе, предназначенной для измерения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) образцов высокотемпературных материалов по их оптическим изображениям в диапазоне температур 1000..3000К. Измерительная система является частью оптического высокотемпературного дилатометра ДОВ-1, разработанного в 2012-2014 гг. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и включенного в состав государственного первичного эталона единицы ТКЛР. Оптико-электронная часть измерительной системы спроектирована по схеме сдвоенного телемикроскопа и разработана при участии автора в ЗАО «КБ ЮПИТЕР» (г. Санкт-Петербург). Частота пространственной дискретизации изображений датчиком удовлетворяет условию теоремы

Котельникова, разрешающая способность системы ограничена дифракционным размытием изображений оптической системой.

Задачей оптико-электронной измерительной системы дилатометра является измерение смещения края исследуемого образца, возникающее в процессе его нагрева печью дилатометра, относительно начального положения края при комнатной температуре. Измерение смещения края образца осложняется тремя основными факторами:

1. ожидаемое линейное температурное расширение измеряемого края образца;
2. паразитная случайная деформация малоразмерных участков края образца;
3. неравномерная яркость изображения образца и фона.

Для снижения влияния линейного расширения образца на оценку смещения его края был разработан алгоритм оценки смещения края, основанный на решении следующей оптимизационной задачи:

$$(k', x'_c, y'_c) = \arg \min_{k, x_c, y_c} \left[\nu(\hat{P}_1|_{k, x_c, y_c}; P_2) \right], \hat{P}_1[i] = kP_1[i] + (x_c, y_c)^T,$$

где k – коэффициент масштабного преобразования контура границы, (x_c, y_c) – искомое смещение контура, P_1 и P_2 – результаты измерения границы края образца для температур T_1 и T_2 соответственно, \hat{P}_1 – реконструкция границы P_1 в соответствии с моделью линейного расширения, ν – значение критерия отклонения границ (6). Для компенсации влияния фактора паразитной деформации контура оптимизируемый функционал (ν) вычисляется по формуле (6) с предварительным отбрасыванием точек границ, для которых расстояние $d[i]$ превосходит пороговое значение ($\lambda\nu$), где λ – настраиваемый коэффициент.

Примеры работы разработанных алгоритмов измерения границы и оценки смещения края образца для реальных изображений, полученных на измерительной системе ДОВ-1, приведены на рис. 6 и 7. Адекватность предложенной математической модели изображения (3) подтверждается высокой степенью её соответствия изображениям, формируемым измерительной системой ДОВ-1 (рис. 6).

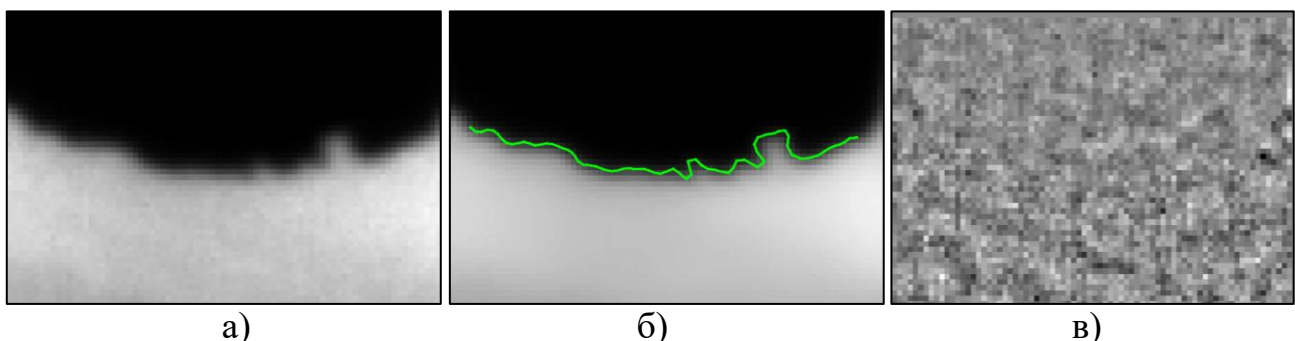


Рис. 6 Пример измерения границы и реконструкции изображения предложенным методом: зарегистрированное изображение образца (а), реконструированное изображение с измеренной границей (б), разность реконструированного и зарегистрированного изображений с усиленным (100х) контрастом (в)

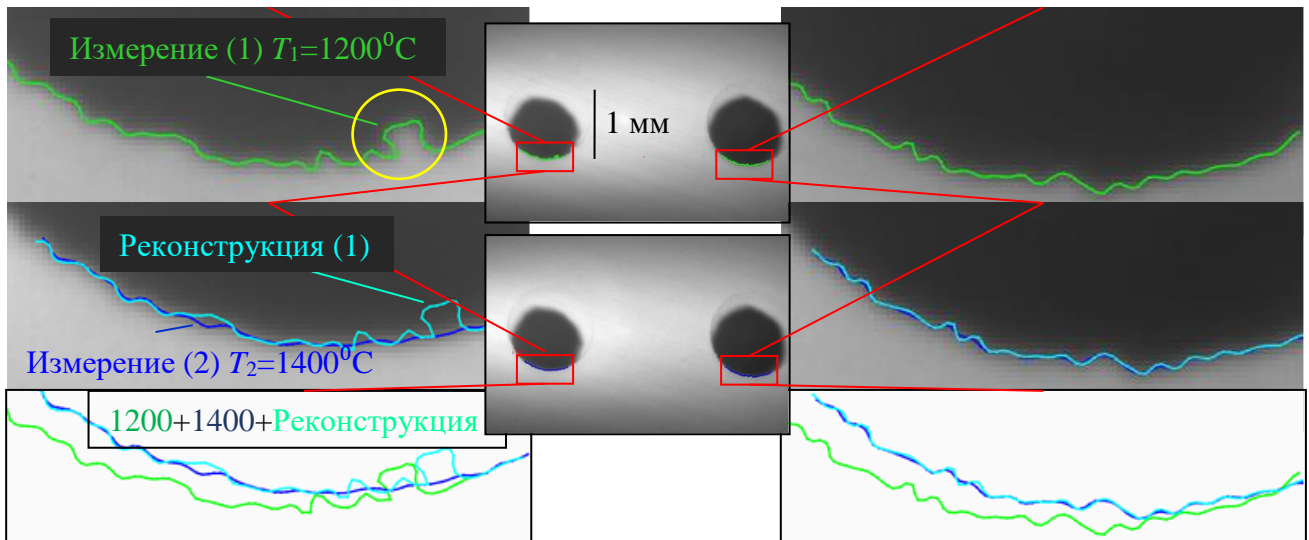


Рис. 7 Иллюстрация работы алгоритма оценки смещения контура: верхний ряд – измеренный контур (1) при $T_1=1200^\circ\text{C}$, средний ряд – измеренный контур (2) при $T_2=1400^\circ\text{C}$ с реконструированным контуром (1), нижний ряд – измеренные и реконструированный контуры на одном изображении; отфильтрованный выброс отмечен кругом

В таблице 1 приведены оценки составляющих погрешности измерения смещения края образца в измерительной системе ДОВ-1, зависящих от метода обработки изображения. Сравняются разработанный метод двумерной аппроксимации (МДА) и методы аппроксимации сигнала функцией ошибок (АСФО), ортогональных моментов Фурье-Меллина (ОМФМ), а также ранее применяемый в рассматриваемой измерительной системе корреляционный метод с предварительной высокочастотной фильтрацией изображения («модифиц. корреляция»). Границы неисключенной систематической погрешности (НСП) охарактеризованы предельными значениями. В плоскости предмета один пиксель эквивалентен 8 мкм.

Таблица 1. Составляющие погрешности измерения смещения края, пиксель

Составляющая	Параметры	Тип	Модифиц. корреляция	На основе краев		
				АСФО	ОМФМ	МДА
Субпиксельная периодическая ошибка	Прямолинейный край	НСП	0.006	0.006	0.19	0.003
	Шероховатый край (СКО профиля 2 пикс.)	НСП	0.01	0.03	0.07	0.007
Неравномерность яркости	градиент <math><0.5\%/\text{пиксель}</math>	НСП	0.05	0.02	0.21	0.01
Паразитная деформация контура	размер <math><4</math> пикселей (*)	НСП	0.1	0.004	0.016	0.001
	размер <math><8</math> пикселей (**)	НСП	0.23	0.07	0.04	0.02

Суммарная предельная НСП (*)			0.16	0.05	0.20	0.02
Суммарная предельная НСП (**)			0.29	0.12	0.44	0.04
Шум изображения	СКО шума <1%	СКО	0.003	0.009	0.004	0.004

Для применения разработанного метода в реальной измерительной системе потребовалось решить задачу измерения импульсного отклика оптико-электронной системы формирования изображений. Измерение импульсного отклика для системы ДОВ-1 осложняется малой глубиной резкости и наличием aberrаций оптической системы. Для решения данной проблемы, с помощью микрозеркальной матрицы и специального стенда для калибровки, было проведено натурное моделирование множества расфокусированных изображений квазиточечного объекта. По полученным изображениям расфокусированного импульсного отклика была построена математическая модель импульсного отклика на основе разложения поля искажений волнового фронта оптической системы в базисе полиномов Цернике. После установки системы и образца в штатное положение, фактическая величина расфокусировки и соответствующий ей импульсный отклик системы определялся по изображению края образца путем решения оптимизационной задачи (4) с оценкой коэффициента расфокусировки как параметра математической модели изображения.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные автором в ходе работы над диссертацией (заключение приведено).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведения анализа известных решений для оценки границ объектов по оптическим изображениям выявлены основные факторы, приводящие к ухудшению результата оценивания границ объектов известными методами: дифракционное ограничение полосы частот изображения, aberrации оптической системы, неравномерная яркость объекта и фона, пониженная частота дискретизации изображения.

2. Разработан метод оценки границ объектов по размытым изображениям, основанный на аппроксимации регистрируемого камерой изображения численной моделью. В отличие от ранее известных аппроксимационных методов оценки границ объектов для размытых изображений, основанных на упрощенных одномерных моделях сигнала в виде гладких функций, разработанный метод основан на двумерной модели регистрируемого камерой изображения.

3. Разработан алгоритм аппроксимации изображения численной моделью на основе двухуровневой численной минимизации функционала невязки регистрируемого и моделируемого изображений (алгоритм решения обратной задачи). Предложена регуляризация решения на основе гипотезы плавности контура объекта.

4. Предложен вычислительно-эффективный алгоритм моделирования дифракционно-размытого изображения объекта с заданной границей (алгоритм

решения прямой задачи). Алгоритм основан на аналитическом расчете фурье-образа ограничивающего объект многоугольника и обеспечивает высокую чувствительность модели к изменениям координат точек границы. Продемонстрировано, что предложенный алгоритм позволяет на 2-3 порядка снизить время моделирования изображений по сравнению решениями, основанными на субпиксельной дискретизации при чувствительности порядка $10^{-2}..10^{-3}$ пикселя. Обоснована эффективность применения разработанного алгоритма для предложенного метода оценки границ.

5. В результате исследования выявлено, что в условиях дифракционного размытия и сложной формы границы объекта эффект от применения разработанного метода приблизительно эквивалентен 2х-3х кратному увеличению разрешающей способности оптической системы с последующим применением известных методов оценки границ. Также установлено, что при сравнении с предварительным восстановлением изображений известными методами приблизительный эквивалент увеличения разрешающей способности системы составляет 20%-30%.

6. Показано, что разработанный метод устойчив к влиянию шума, неравномерности яркости, пониженной частоте дискретизации и отклонению фактического импульсного отклика системы от модельного. Дополнительно выявлено, что в условиях неравномерной яркости объекта и/или фона, при условии адекватно выбранной модели распределения яркости разработанный метод является не только устойчивым к неравномерности яркости, но также позволяет получить более точную оценку координат элементов границы по сравнению с известными методами.

7. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод оценки границ и позволяющее применять его для обработки изображений в интерактивном и пакетном режимах. С целью повышения быстродействия применена технология параллельных вычислений OpenCL.

8. В результате применения разработанного метода в прикладной задаче оптического измерения температурного коэффициента линейного расширения было достигнуто 3-х кратное снижение методической составляющей погрешности измерения по сравнению с известными методами оценки границ. Для этого были разработаны и реализованы:

- методика калибровки импульсного отклика измерительной системы в условиях малой глубины резко изображаемого пространства оптической системы;
- алгоритм оценки смещения контура края образца при его линейной деформации со случайной (паразитной) составляющей;
- специализированное программное обеспечение измерительной системы высокотемпературного дилатометра ДОВ-1, обеспечивающее регистрацию и обработку изображений с применением разработанных алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Иночкин Ф. М., Круглов С. К., Бронштейн И. Г. Преодоление дифракционного предела при оптических измерениях границ объектов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1. С. 96–105. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.96.
2. Иночкин Ф. М., Белашенков Н. Р. Вычислительно-эффективный метод численного моделирования дифракционно-размытых изображений объектов с кусочно-линейным контуром границы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. С. 826–833. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-826-833
3. И. Г. Бронштейн, Ф. М. Иночкин, С. К. Круглов, Т. А. Компан, С. В. Кондратьев, А. С. Коренев, Н. Ф. Пухов. Оптико-электронная измерительная система высокотемпературного дилатометра // Измерительная техника. 2015. №12, С. 38-42.
I. G. Bronshtein, F. M. Inochkin, S. K. Kruglov, T. A. Kompan, S. V. Kondratiev, A. S. Korenev, N. F. Puhov. Optoelectronic Measurement System for a High-Temperature Dilatometer. Measurement Techniques, 2016. vol. 58. issue 12. pp. 1347-1353.
4. Т. А. Компан, С. В. Кондратьев, А. С. Коренев, Н. Ф. Пухов, И. Г. Бронштейн, Ф. М. Иночкин, С. К. Круглов. Расширение температурного диапазона государственного первичного эталона единицы температурного коэффициента линейного расширения твердых тел // Измерительная техника. 2015. №12, С. 34-38.
T. A. Kompan, S. V. Kondratiev, A. S. Korenev, N. F. Puhov, F. M. Inochkin, S. K. Kruglov, I. G. Bronshtein. Extending the Temperature Range of the National Primary Standard for the Unit of the Thermal Linear Expansion Coefficient. Measurement Techniques, 2016. vol. 58. issue 12. pp. 1341-1346.

В журналах, включенных в международную базу цитирований Scopus:

5. T. A. Kompan, S. V. Kondratiev, A. S. Korenev, N. F. Puhov, F. M. Inochkin, S. K. Kruglov, I. G. Bronshtein. Measurement of the Thermal Expansion Coefficient for Ultra-High Temperatures up to 3000 K. International Journal of Thermophysics, (2018) 39: 40 doi: 10.1007/s10765-017-2353-0.

Патенты на изобретения:

6. Пат. 2529369 Российская Федерация, МПК Н04N3/00. Способ формирования сигнала изображения с помощью матричных приборов с зарядовой связью / Бронштейн И. Г., Круглов С. К., Иночкин Ф. М.; заявл. 21.10.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. №27. – 9 с.

Сборники конференций:

7. F. M. Inochkin, S. K. Kruglov, I. G. Bronshtein, T. A. Kompan, S. V. Kondratjev, A. S. Korenev, N. F. Puhov, "Superresolution Contour Reconstruction Approach to a Linear Thermal Expansion Measurement," 2018 25th IEEE International

- Conference on Image Processing (ICIP), Athens, Greece, 2018, pp. 3843-3847. doi: 10.1109/ICIP.2018.8451081.
8. Иночкин Ф. М. Регуляризация решения в задаче сверхразрешающего восстановления контура объекта // *Материалы XXI-й м/н конференции по мягким вычислениям и измерениям, SCM 2018.* – Санкт-Петербург, 2018. Т.2 С. 151-154.
 9. Иночкин Ф. М., Круглов С. К., Бронштейн И. Г. Применение методов восстановления изображений для повышения точности измерения контуров объектов в условиях дифракционного размытия // *Тезисы докладов 15-й м/н конференции "Телевидение: передача и обработка изображений".* – Санкт-Петербург, 2018. С. 208-211.
 10. Inochkin F. M., Kruglov S. K., Bronshtein I. G., Kompan T. A., Kondratjev S. V., Korenev A. S., Pukhov N. F. Subpixel Edge Estimation with Lens Aberrations Compensation Based on the Iterative Image Approximation for High-Precision Thermal Expansion Measurements of Solids // *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X: Proc. SPIE. Munich, 2017. Vol. 10329.* doi:10.1117/12.2270204.
 11. Inochkin F. M., Pozzi, P., Bezzubik, V.V., Belashenkov, N.R. Increasing the space-time product of super-resolution structured illumination microscopy by means of two-pattern illumination // *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X: Proc. SPIE. Munich, 2017. Vol. 10330.* doi: 10.1117/12.2271835.
 12. Иночкин Ф. М., Круглов С. К., Васильев В.Б., Бронштейн И. Г. Компенсация неопределенности масштаба в задачах измерения геометрии объекта методом аппроксимации его оптического изображения с субпиксельной точностью // *Материалы XX-й м/н конференции по мягким вычислениям и измерениям, SCM 2017.* – Санкт-Петербург, 2017. С. 264-267.
F. M. Inochkin, S. K. Kruglov, V. B. Vasiliev and I. G. Bronshtein, "Scale uncertainty compensation for the problem of object's geometry estimations by means of its optical image approximation with subpixel accuracy," 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, 2017, pp. 600-602. doi: 10.1109/SCM.2017.7970662.
 13. F. Inochkin, S. Kruglov and I. Bronshtein, "Accurate 3D location estimation of point sources in single-sensor optical systems by means of wavefront phase retrieval and calibration," 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, 2017, pp. 672-677. doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910646.
 14. Иночкин Ф. М., Круглов С.К., Бронштейн И.Г., Компан Т.А., Кондратьев С.В., Корнев А.С. Применение микрозеркальной матрицы для калибровки характеристик оптико-электронной измерительной системы высокотемпературного дилатометра // *Тезисы докладов 13-й м/н конференции "Телевидение: передача и обработка изображений".* – Санкт-Петербург, 2016. С. 180-183.
 15. Иночкин Ф. М., Круглов С. К., Бронштейн И. Г. Определение аберраций волнового фронта оптической системы в цифровых камерах высокого

разрешения по регистрируемым изображениям точечного тест-объекта // Тезисы докладов 13-й м/н конференции "Телевидение: передача и обработка изображений". – Санкт-Петербург, 2016. С. 175-178.

16. Иночкин Ф. М., Круглов С.К., Бронштейн И.Г., Компан Т.А., Кондратьев С.В. Аппаратно-программный комплекс бесконтактного измерения удлинения на эталонном дилатометре в температурной области интенсивного свечения объектов // Тезисы докладов 5-й всероссийской и стран КОOMET конференции "Температура-2015". – Санкт-Петербург, 2015. С. 280-282.
17. Иночкин Ф. М., Круглов С. К., Бронштейн И. Г. Влияние цифрового и аналогового суммирования отсчетов сигнала на отношение сигнал-шум в цифровых ПЗС камерах // Тезисы докладов 10-й м/н конференции "Телевидение: передача и обработка изображений". – Санкт-Петербург, 2013. С. 18-22.