

На правах рукописи
УДК 681.786

Горевой Алексей Владимирович

**СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ С
ЗОНДОВЫМИ ПРИЗМЕННО-ЛИНЗОВЫМИ
ОПТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» и в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН.

Научный руководитель: **Колючкин Василий Яковлевич,**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры лазерных и оптико-электронных систем ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный консультант: **Мачихин Александр Сергеевич,**
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории акустооптической спектроскопии ФГБУН Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

Официальные оппоненты: **Сясько Владимир Александрович,**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры метрологии, приборостроения и управления качеством ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»

Романова Галина Эдуардовна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент факультета прикладной оптики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Защита состоится «3» июня 2020 г. в 10 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана, расположенном по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «____» 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Ковалев М. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Видеоэндоскопические измерительные системы широко применяются для визуально-измерительного контроля (ВИК) при производстве, сборке и испытаниях многих промышленных объектов (авиационных и ракетных двигателей, трубопроводов, баллонов высокого давления и др.), а также в биомедицине для диагностики заболеваний внутренних органов и проведения хирургических операций. Стереоскопический метод измерения трехмерных (3D) геометрических параметров поверхности объекта является одним из основных в видеоэндоскопии, поскольку он обеспечивает одновременную визуализацию и проведение измерений во всех точках изображения и не требует получения нескольких последовательных кадров. В современных серийно выпускаемых видеоэндоскопах (Olympus Corp., General Electric, EFER) для реализации стереоскопического метода используются призменно-линзовые оптические системы (ОС), позволяющие одновременно получить два изображения объекта с разных ракурсов на одном матричном приемнике излучения (МПИ), как показано на Рисунке 1.

Метрологические характеристики стереоскопических измерительных систем определяются совокупностью параметров оптико-электронной системы (ОЭС), используемых математических моделей (ММ) и алгоритмов цифровой обработки данных. При общепринятом последовательном проектировании оптимизация параметров ОС проводится для получения изображений наилучшего качества без учета методов их дальнейшей обработки, что может приводить к неоптимальным конструкторским и программным решениям. Этот недостаток может быть устранен за счет системного подхода к проектированию ОЭС, разрабатываемого рядом отечественных и зарубежных научных школ: МГТУ имени Н.Э. Баумана, МИИГАиК, СПбНИУ ИТМО и др. Применение такого подхода к стереоскопическим измерительным системам подразумевает совместное компьютерное моделирование для оптимизации параметров ОС и алгоритмов обработки зарегистрированных изображений при использовании целевой функции, основанной на погрешности измерений. Это особенно важно для призменно-линзовых ОС, в которых параметры призмы оказывают существенное влияние как на качество изображения, так и на базовое расстояние стереопары, от которого зависит погрешность измерений. Известные методы и системы автома-

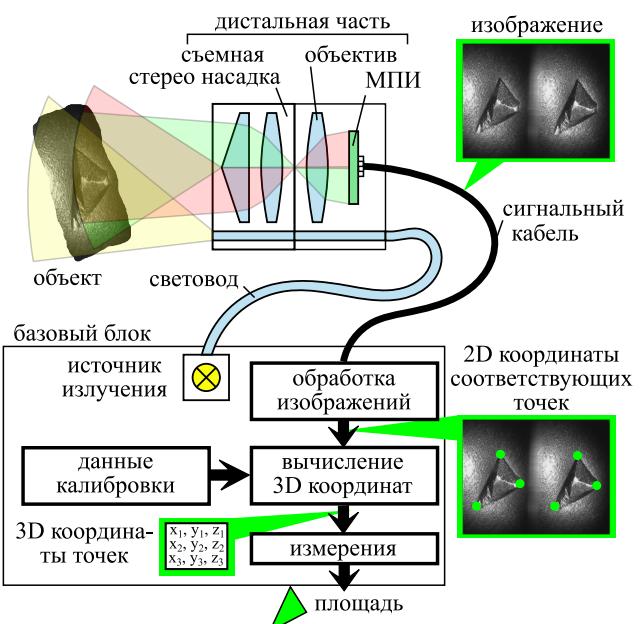


Рисунок 1. Структурная схема видеоэндоскопической измерительной системы с призменно-линзовой стереоскопической ОС.

1

тизированного проектирования (САПР) не позволяют реализовать системный подход к проектированию таких систем.

Кроме того, на данный момент отсутствуют общепринятые нормативные документы, в которых регламентируются методики и эталонные объекты для проведения калибровки и поверки стереоскопических видеоэндоскопов. Основным методом обеспечения заданной погрешности измерений при эксплуатации этих приборов является периодическая поверка с помощью серий контрольных измерений эталонных объектов, которые позволяют получить оценку погрешности лишь в условиях контроля, близких к идеальным. Программное обеспечение (ПО) современных видеоэндоскопов предусматривает только предупреждение пользователя о допустимости проведения измерений без указания конкретной оценки погрешности или индикацию примерного расстояния до объекта, что приводит к необходимости проверять полученные результаты альтернативными методами, в том числе методами разрушающего контроля. Таким образом, разработка оборудования для поверки и калибровки, а также методов оценки погрешности измерений при их проведении является актуальной задачей, которая также может быть решена в рамках системного подхода к проектированию.

Измерительные возможности стереоскопических зондовых систем могут быть существенно расширены за счет использования спектральной фильтрации излучения. Регистрация изображений в узких спектральных интервалах (УСИ) позволяет повысить контраст изображения, а значит, и точность измерений при надлежащем выборе спектрального диапазона. Анализ спектральных характеристик в каждом пикселе изображения имеет множество приложений в промышленности и биомедицине. При проведении ВИК промышленных объектов, как правило, имеется информация о форме их поверхности в виде 3D модели или чертежа, позволяющего построить такую модель. Более того, в некоторых случаях ВИК проводится с использованием системы точного позиционирования зонда относительно контролируемого объекта, то есть доступна информация о взаимном расположении зонда и 3D модели объекта. Тогда точность измерений параметров поверхностных дефектов, например, пятен ржавчины, может быть существенно повышена при учете указанной априорной информации. Рассмотренные варианты расширения возможностей требуют модификации алгоритмов обработки данных с учетом особенностей ОС, в частности, хроматических aberrаций, вносимых призмой, и могут быть оптимальным образом реализованы только с использованием системного подхода к проектированию.

Целью диссертационной работы является разработка методов, реализующих системный подход к проектированию стереоскопических информационно-измерительных приборов с зондовыми призменно-линзовыми ОС, обеспечивающих улучшение их технических характеристик и расширяющих функциональные возможности контроля.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- Выявлены источники погрешности и разработано математическое описание стереоскопических измерительных систем, позволяющее определить целевую

функцию проектирования на основе погрешности измерений геометрических параметров и учитывать априорную информацию о форме поверхности объекта и расположении зонда относительно нее.

- Разработаны ММ ОЭС для стереоскопического метода измерения 3D координат точек поверхности объекта по их проекциям на изображениях, учитывающие конструктивные особенности призменно-линзовых ОС и возможность выполнения измерений в УСИ, и метод калибровки.
- Адаптированы известные и предложены новые методы цифровой обработки изображений для вычисления координат соответствующих точек и координат маркеров тест-объекта, а также для оценки погрешности этих координат.
- Разработана методика проектирования стереоскопических измерительных систем на основе совместного компьютерного моделирования аппаратной части ОЭС, алгоритмов обработки данных и оборудования, используемого для калибровки и аттестации.
- Апробированы предложенные методы и методика проектирования, проведены экспериментальные исследования на серийно выпускаемых и вновь разработанных зондовых призменно-линзовых стереоскопических системах.

Научная новизна.

- Разработан метод оценки погрешности геометрических измерений на основе комбинации сигма-точечного преобразования и интервального анализа, который позволяет получать интервальную оценку для различных ММ стереоскопических ОЭС при известной погрешности координат соответствующих точек на изображениях и погрешности калибруемых параметров ММ. Предложена модификация метода для измерений, проводимых с учетом априорной информации о форме контролируемой поверхности и расположении зонда относительно нее.
- Показано, что для зондовой призменно-линзовой ОЭС использование трассировочной ММ позволяет обеспечить ту же величину систематической погрешности геометрических измерений при значительно (в ~ 10 раз) меньшем числе параметров, чем у проективной ММ. Систематическая погрешность геометрических измерений, обусловленная аберрациями зрачка объектива, может быть снижена за счет введения в трассировочную ММ радиального полинома, описывающего эти аберрации.
- Разработаны модификация трассировочной ММ для призменно-линзовой ОЭС и метод совместной калибровки ее параметров в нескольких УСИ с последующей интерполяцией спектрально-зависимых параметров для других УСИ. Для зондовой призменно-линзовой ОС показано, что при калибровке в трех УСИ и интерполяции фокусного расстояния и показателя преломления призмы систематическая погрешность геометрических измерений в шести УСИ в пределах видимого диапазона практически не отличается от погрешности при калибровке в каждом УСИ по отдельности и более чем в 3 раза ниже погрешности при калибровке в одном УСИ или без спектральной фильтрации.
- Предложены метод ректификации изображений для ММ стереоскопических

ОЭС с обратной трассировкой лучей, использующий проекцию на промежуточную плоскость в пространстве предметов, и метод выбора оптимального положения данной плоскости.

- Разработан метод оценки погрешности координат изображений маркеров, образованных в углах клеток тест-объекта в виде шахматной доски, который может применяться как при проектировании стереоскопических измерительных систем, так и при проведении измерений в процессе эксплуатации.

Практическая значимость работы.

- Предложенные методы системного проектирования были использованы в НТЦ УП РАН при разработке опытного образца зондовой призменно-линзовой стереоскопической системы, который прошел метрологическую сертификацию.
- На основе разработанных ММ и методов обработки данных созданы модули ПО зондовых стереоскопических систем, позволяющие получать текстурированные (в том числе мультиспектральные при работе в УСИ) 3D модели объектов, измерять геометрические параметры объектов и оценивать погрешность измерений, проводить калибровку и аттестацию системы.
- Предложенные методы компьютерного моделирования и метод оценки погрешности могут быть встроены в современные САПР ОС для оптимизации параметров стереоскопической ОС, анализа влияния допусков и температурных деформаций.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы геометрической оптики, теории ОЭС, цифровой обработки сигналов, теории вероятностей и математической статистики, математического моделирования и экспериментальные исследования.

Положения, выносимые на защиту:

- Метод интервальной оценки погрешности геометрических измерений позволяет оптимизировать конструктивные параметры стереоскопических ОЭС при заданных погрешностях определения координат соответствующих точек на изображениях, в том числе, с учетом априорной информации о форме контролируемой поверхности и относительном положении зонда.
- Геометрооптическая ММ призменно-линзовой стереоскопической ОЭС, учитывая аберрации зрачка объектива, и метод калибровки ее параметров в трех УСИ позволяют уменьшить систематическую погрешность геометрических измерений в пределах видимого диапазона по сравнению с известными ММ и калибровкой в одном УСИ или без спектральной фильтрации.
- Метод ректификации изображений для геометрооптической ММ призменно-линзовой стереоскопической ОЭС с обратной трассировкой лучей, использующий проекцию на одну оптимально расположенную плоскость в пространстве предметов, обеспечивает меньшую величину вертикального рассогласования соответствующих точек на ректифицированных изображениях по сравнению с известным методом ректификации для проективной ММ.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректностью постановки задач и использованных приближений, использованием

апробированных методов компьютерного моделирования и обработки экспериментальных данных, согласием результатов теоретического расчета с результатами компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 16 международных конференциях и симпозиумах: «Прикладная оптика» (Санкт-Петербург, 2014), ARMIMP (Сузdalь, 2015), «Graphi-Con» (Нижний Новгород, 2016; Пермь, 2017), PALS (Саратов, 2016), «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering» (Порторож (Словения), 2017), ECNDT (Гетеборг (Швеция), 2018), SPIE Photonics Europe (Страсбург (Франция), 2018), ITNT (Самара, 2018, 2019), DSPA (Москва, 2018), ICMV (Мюнхен (Германия), 2018; Амстердам (Нидерланды), 2019), DISP (Оксфорд (Великобритания), 2019), SPIE Optical Metrology (Мюнхен (Германия), 2019), ФПО (Санкт-Петербург, 2019).

Результаты работы внедрены в АО «НПО Энергомаш имени В.П. Глушко» и ФГУП «НПО «Техномаш», получены соответствующие акты.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 36 печатных работ, в том числе 2 патента РФ [1, 2], 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [3, 4], 19 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus [5–23].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Во всех работах, выполненных в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, разработке методов их решения, получении, обработке и анализе результатов исследований. Все экспериментальные результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем диссертации 199 страниц, без учета приложения — 180 страниц, включая 87 рисунков и 6 таблиц. Библиография содержит 240 наименований на 18 страницах, без учета публикаций автора — 204 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, описана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе изложены особенности системного подхода к проектированию стереоскопических измерительных систем и разработано математическое описание таких систем, позволяющее определить целевую функцию проектирования как зависимости погрешностей измерений от конструктивных параметров ОЭС и параметров алгоритмов обработки данных.

В соответствии со схемой работы стереоскопической измерительной системы при одновременной регистрации двух изображений был проведен анализ источников погрешности и разработана структурная схема моделирования для расчета значений целевой функции в виде погрешностей измерений, показанная на Рисунке 2. Для ее реализации необходимо задать анализируемые характеристики и параметры объекта измерений и его изображений, принять математическое описание погрешности каждой величины, ММ ОЭС регистрации изображений и описание алгоритмов обработки данных, которые позволяют проводить расчет погрешностей.

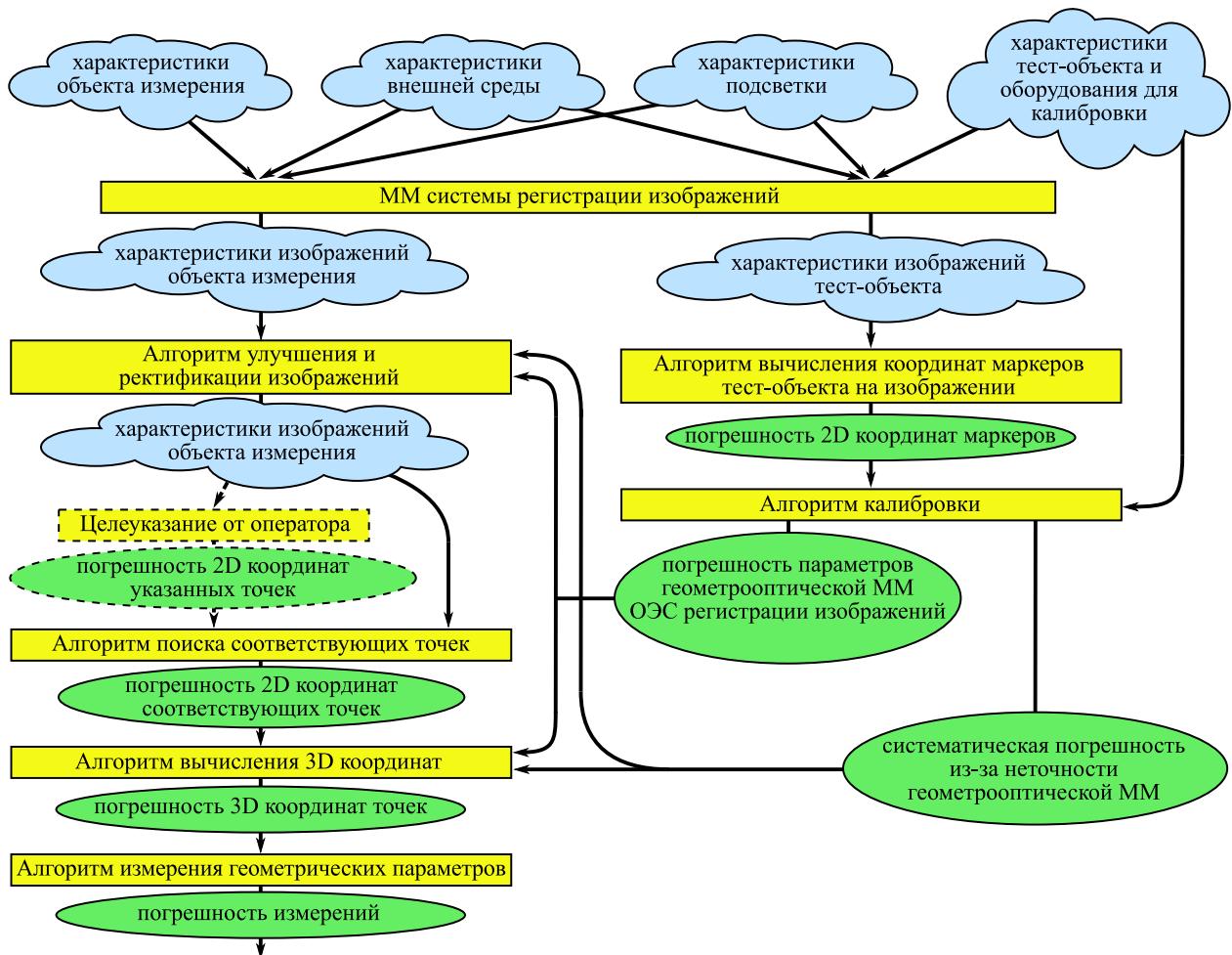


Рисунок 2. Структурная схема моделирования для расчета погрешности измерений, выполняемых стереоскопической измерительной системой.

В алгоритме вычисления 3D координат используется геометрооптическая ММ ОЭС, вектор параметров k которой определяется на основе результатов геометрической калибровки. Такая модель содержит минимум информации об ОЭС регистрации изображений, необходимый для вычисления 3D координат точки x_w в глобальной системе координат (ГСК) по ее двумерным (2D) проекциям r_i на двух изображениях (i — номер изображения). Эта информация также может использоваться для ограничения области поиска или дополнительной обработки изображений (устранения дисторсии, ректификации) при поиске соответствующих точек. Выбор этой ММ осуществляется при проектировании и

является компромиссом между полнотой описания (минимум систематической погрешности) и устойчивостью к шуму (минимум случайной погрешности). Исходя из проведенного анализа литературы, выделено два типа ММ, используемых для описания призменно-линзовых стереоскопических ОЭС: проективные (pinhole) ММ, в которых две части изображения, полученные через две части призмы, рассматриваются как полученные двумя виртуальными ОЭС, и трассировочные (ray-tracing) ММ, в которых используется комбинация проективной ММ и обратной трассировки лучей через призму.

Геометрооптическая ММ ОЭС в достаточной степени адекватна для расчета результата преобразования погрешности алгоритмами вычисления 3D координат и измерения геометрических параметров, что позволяет использовать ее для предварительных расчетов на системотехническом уровне проектирования стереоскопической измерительной системы (например, габаритного расчета) и для формулировки основных требований к ОС и МПИ. В соответствии с этим предложен метод оценки погрешности, использующий сначала сигма-точечное преобразование (unscented transformation) для перехода от погрешности координат соответствующих точек \mathbf{r}_i и погрешности элементов вектора параметров \mathbf{k} к погрешности вычисленных 3D координат $\hat{\mathbf{x}}_w$, а затем интервальный анализ для перехода от погрешности $\hat{\mathbf{x}}_w$ к погрешности измеренных длин отрезков, площадей и других геометрических параметров \hat{r} [16]. Работоспособность метода для проективной и трассировочной ММ и его преимущество над методом линеаризации подтверждены сравнением результатов его применения с результатами компьютерного моделирования методом Монте-Карло. Показано, что для описания погрешности измерений длин отрезков целесообразно использовать 95%-й интервал вместо среднеквадратического отклонения (СКО) из-за несимметричности плотности распределения измеряемых величин. Поскольку погрешность измерения 3D координат точки обладает значительной анизотропией, то погрешность измерения длины отрезка зависит не только от его расположения в рабочем объеме, но и от его ориентации и длины. Это должно быть учтено при задании расчетных точек в рабочем объеме для формирования целевой функции.

Универсальность предложенного метода позволяет применять его на системотехническом уровне проектирования ОС, используя для расчета трассировки лучей через ОС существующие САПР. Это обеспечивает одновременное проведение aberrационного анализа и анализа погрешности геометрических измерений, а также оптимизацию параметров ОС средствами САПР. В качестве примера в работе рассмотрено проведение в САПР Zemax расчета зависимости поперечных aberrаций и погрешностей измерений от материала призмы и угла при ее вершине для оптической схемы зондовой призменно-линзовой ОЭС №1, основные параметры которой приведены в Таблице 1.

Предложена модификация метода с учетом априорной информации о форме контролируемой поверхности и расположении зонда относительно данной поверхности [2, 22, 23]. При помощи компьютерного моделирования показано,

Таблица 1

Использованные призменно-линзовые стереоскопические ОЭС

	Разработанные в НТЦ УП РАН		Серийно выпускаемые General Electric	
	ОЭС №1	ОЭС №2	Mentor Visual iQ*	XLGo+**
Диаметр зонда, мм	8	6	6,1	6,2
Размер МПИ, разрешение	1/6" 1920 × 1080	1/9" 1280 × 720	1/6" 768 × 576	1/10" 640 × 480
Рабочий диапазон расстояний, мм	5...40	5...40	4...80	4...80
Угловое поле каждого канала по диагонали, °	58	52	60	60

* с призменно-линзовой стереоскопической насадкой XLG3TM616060FG

** с призменно-линзовой стереоскопической насадкой PXTM626060FG

что погрешность измерения 3D координат точек и длин линий на цилиндрической поверхности может быть значительно уменьшена за счет учета априорной информации о форме данной поверхности и расположении зонда относительно нее. Оценено влияние погрешности позиционирования зонда на результат измерений с учетом априорной информации, что позволяет рассчитать допуски для системы позиционирования.

Рассмотренные в первой главе методы представлены в общем виде и могут быть использованы не только для призменно-линзовых и других стереоскопических систем, но и для устройств с большим количеством ОС и МПИ, а также для триангуляционных систем со структурированной подсветкой.

Во второй главе изложены методы геометрической калибровки и проанализированы связанные с ними источники погрешности. При проектировании стереоскопических измерительных приборов с призменно-линзовыми ОС для алгоритма калибровки требуется решить следующие задачи:

- Выбор оптимальной геометрооптической ММ ОЭС регистрации изображений.
- Оптимизация процедуры и оборудования для калибровки, по итогам которой назначаются: допустимые погрешности изготовления тест-объекта, требуемое количество его положений и регистрируемых изображений, требования к точности его позиционирования (при наличии).
- Модификация метода и геометрооптической ММ при работе в УСИ, выбор количества и положения УСИ в пределах общего рабочего спектрального диапазона системы для проведения калибровки.

Для их решения в работе использовано компьютерное моделирование, схема которого показана на Рисунке 3. При помощи САПР для каждой точки при каждом положении тест-объекта производится прямая трассировка главного луча через ОС для каждого УСИ на его центральной длине волны и вычисляются 2D координаты точки $\bar{p}_{i,j,k,l}$ на изображениях (j, k и l — номера точки, положе-

ния и УСИ соответственно). После добавления к этим координатам случайной величины с нулевым средним и СКО σ_p полученные 2D координаты $\mathbf{p}_{i,j,k,l}$ используются в качестве исходных данных для калибровки и измерений.

Для экспериментальной проверки был собран стенд, позволяющий получить изображения плоского тест-объекта в виде шахматной доски в 6 УСИ в диапазоне 460...704 нм (показан на Рисунке 4) и без спектральной фильтрации, и 4 видеоэндоскопические измерительные системы (в соответствии с Таблицей 1). Использовались 3 тест-объекта с размером клеток 0,5 мм, 1 мм и 2 мм, изготовленных нанесением хромового покрытия на стекло с максимальным отклонением размеров клеток от номинального менее 1 мкм. Со стороны источника излучения перед стеклянной пластиной тест-объекта было помещено молочное стекло. Сдвиг тест-объекта вдоль оси z осуществлялся при помощи столика с микрометрической подвижкой, обеспечивающей погрешность перемещения не более ± 2 мкм на 25 мм.

При помощи предложенного компьютерного моделирования для ОЭС №1 проведен сравнительный анализ проективных и трассировочных ММ и получены оценки систематической погрешности измерений (3D координат точек и длин отрезков) для номинальных параметров ОЭС и с учетом допусков, а также случайной погрешности измерений, вызванной погрешностью 2D координат $\mathbf{p}_{i,j,k,l}$ при калибровке и при измерениях [7, 10]. На Рисунке 5 приведены средние значения и 95%-е интервалы для отклонений измеренных длин отрезков в 1 мм, ориентированных вдоль осей координат. Показано, что использование трассировочной ММ (Prism) является предпочтительным по сравнению с проективной ММ (Pinhole) из-за значительной дисторсии и aberrаций зрачка, вносимых призмой. Предложена модификация трассировочной ММ (Prism-mod), включающая радиальный полином с коэффициентами 3-го, 5-го и 7-го порядка для описания aberrаций зрачка объектива ОС. Показано, что для ОЭС №1 эта модификация позволяет снизить систематическую погрешность измерений более чем в 5 раз и не приводит к заметным изменениям для другого варианта оптической схемы с меньшими aberrациями зрачка, отличающегося формой первой отрицательной линзы. Чтобы получить систематическую погрешность, меньшую или равную погрешности трассировочной ММ, проективная

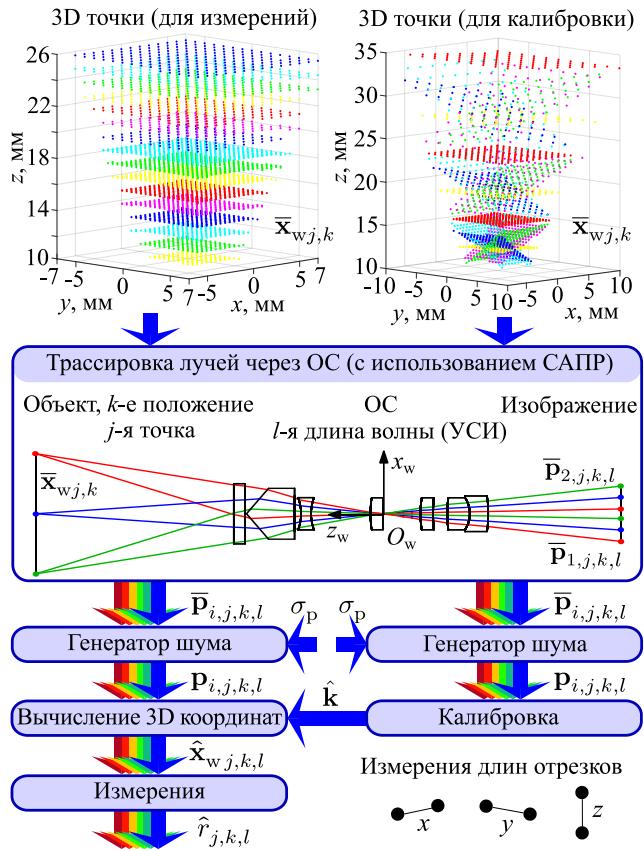


Рисунок 3. Схема компьютерного моделирования калибровки и измерений.

ММ должна быть дополнена полиномиальным описанием дисторсии до 7-го порядка и аберраций зрачка до 5-го порядка (Poly). Это приводит к использованию 218 параметров у такой проективной ММ в отличие от 20 параметров у трассировочной ММ, что делает проективную ММ менее устойчивой к погрешности координат маркеров тест-объекта на изображениях калибровочной серии.

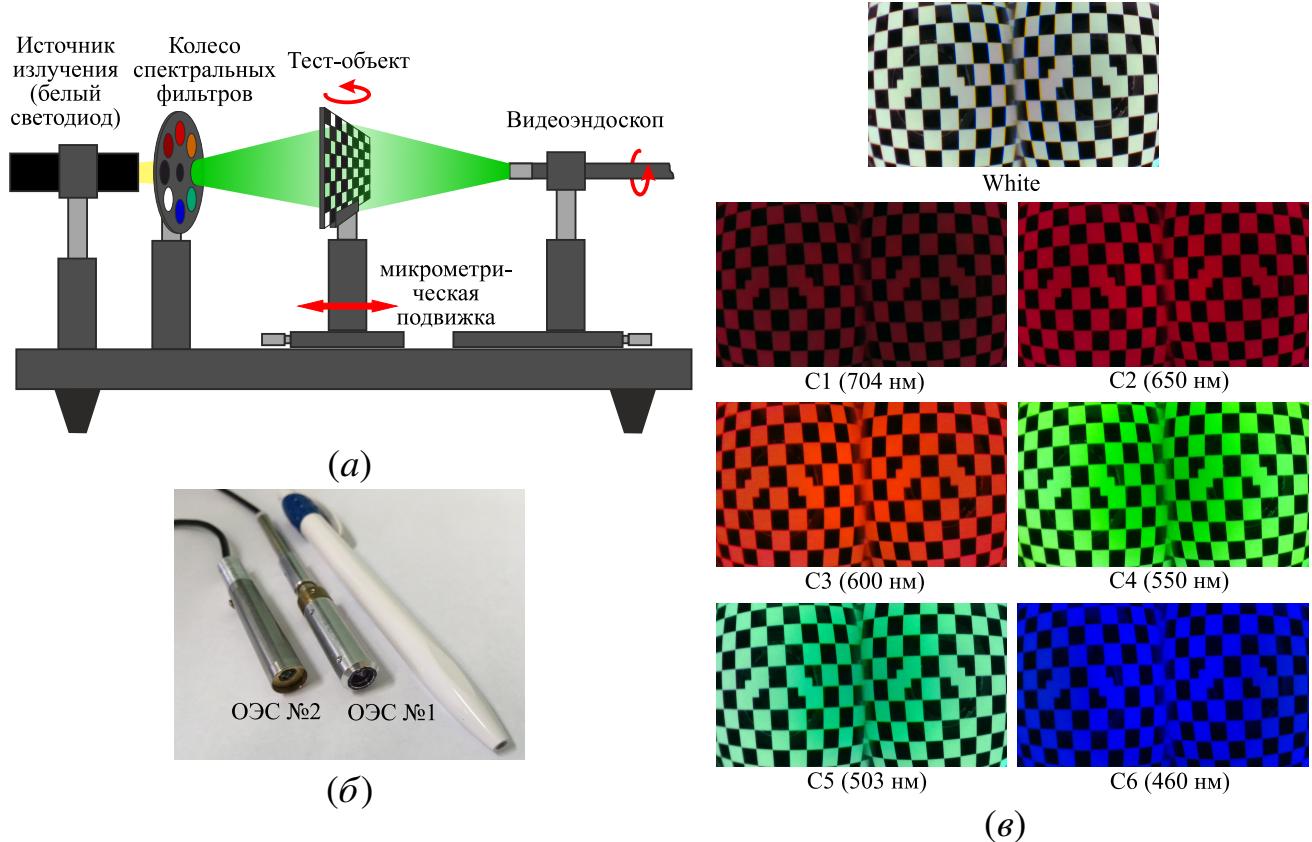


Рисунок 4. Стенд для экспериментальных исследований (a). Опытные образцы зондовых призменно-линзовых ОЭС №1 и №2 (б). Примеры полученных изображений без спектральной фильтрации (White) и в 6 УСИ (C1 – C6) (в).

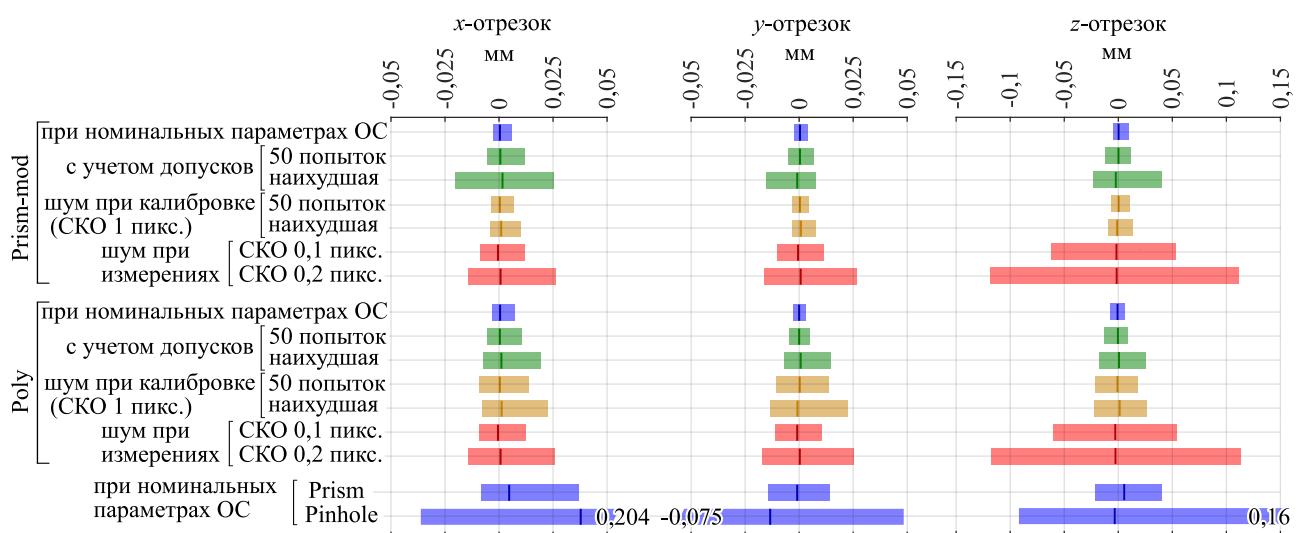


Рисунок 5. Средние значения (отмечены чертой) и 95%-е интервалы (прямоугольник) отклонений измеренных длин отрезков в 1 мм.

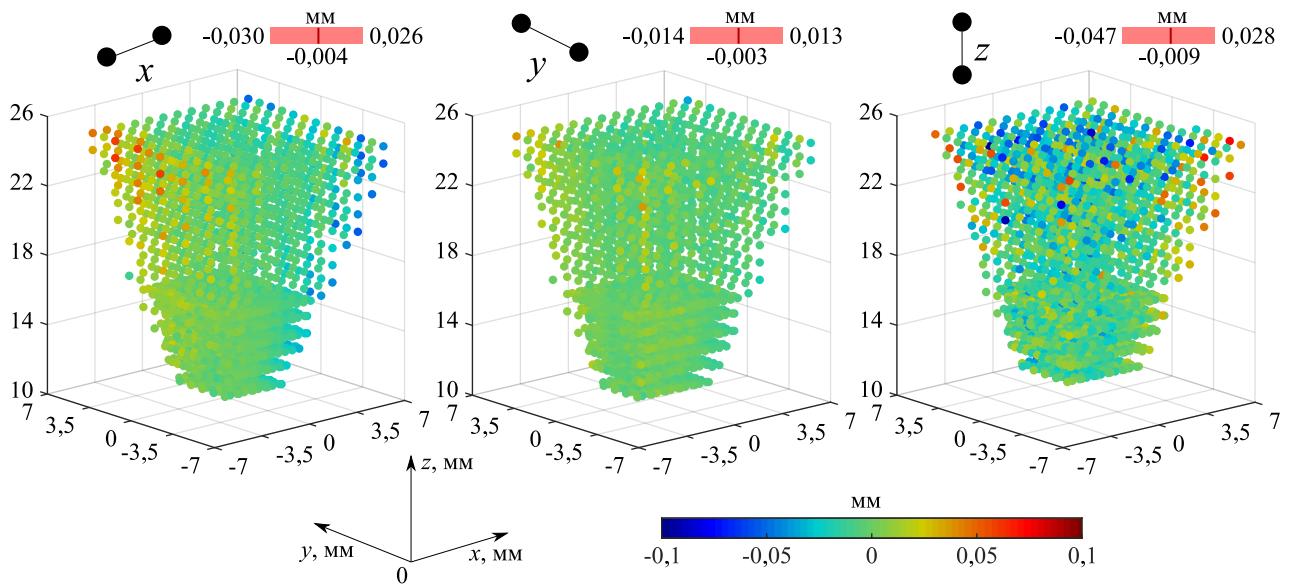


Рисунок 6. Отклонения измеренных длин отрезков в 1 мм, направленных вдоль осей x (слева), y (в центре) и z (справа), в зависимости от координат середины отрезка (показаны цветом), средние значения и 95%-е интервалы (показаны красной чертой и прямоугольником).

По итогам моделирования предложенная в данной работе трассировочная ММ выбрана в качестве оптимальной для ОЭС №1. Результаты моделирования согласуются с результатами экспериментов с опытным образцом ОЭС №1 (без спектральной фильтрации) [7, 10]. Экспериментально измеренные при помощи тест-объекта в виде шахматной доски отклонения длин отрезков для выбранной ММ, а также средние значения и 95%-е интервалы для всего рабочего объема показаны на Рисунке 6. Для серийно выпускаемых систем, указанных в Таблице 1, также экспериментально подтверждено, что использование трассировочной ММ позволяет значительно снизить погрешность измерений по сравнению с проективными ММ как для эталонных объектов, так и для лопаток двигателей [15, 18–20]. Для аттестованного на профилометре металлического объекта с трапецидальным выступом показано, что использование проективной ММ без учета aberrаций зрачка приводит к искажению получаемых корреляционным методом 3D моделей объектов и профилей поверхности [11, 12] (Рисунок 7).

Проведено сравнение двух методов позиционирования тест-объекта: широко используемого метода с поворотами тест-объекта вокруг горизонтальной и вертикальной осей без точного позиционирования и метода со смещением тест-объекта

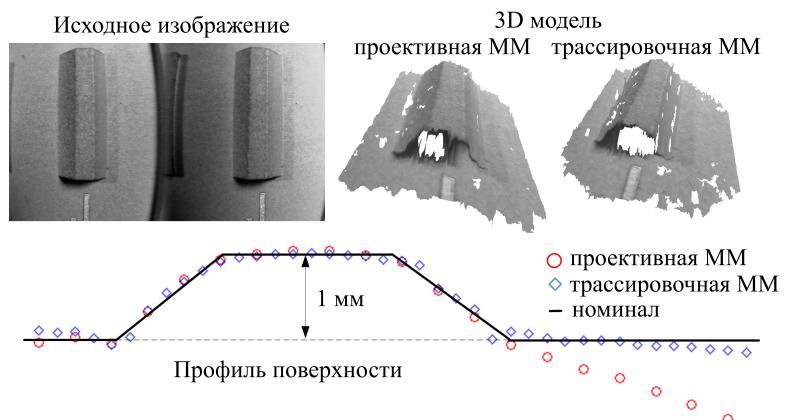


Рисунок 7. Сравнение 3D моделей и профилей аттестованного металлического объекта.

на точно заданное расстояние без поворота. В процессе моделирования для ОЭС №2 получены оценки случайной погрешности измерений 3D координат точек и длин отрезков, вызванной погрешностью 2D координат при калибровке, в зависимости от количества положений и количества используемых тест-объектов [6, 9], которые схематично показаны на Рисунке 8. В обозначениях типа S1 буквы S, M и L соответствуют тест-объектам с размером клеток 0,5 мм, 1 мм и 2 мм, а цифра показывает расстояние вдоль оси z , на которое смещается

тест-объект на каждом шаге.

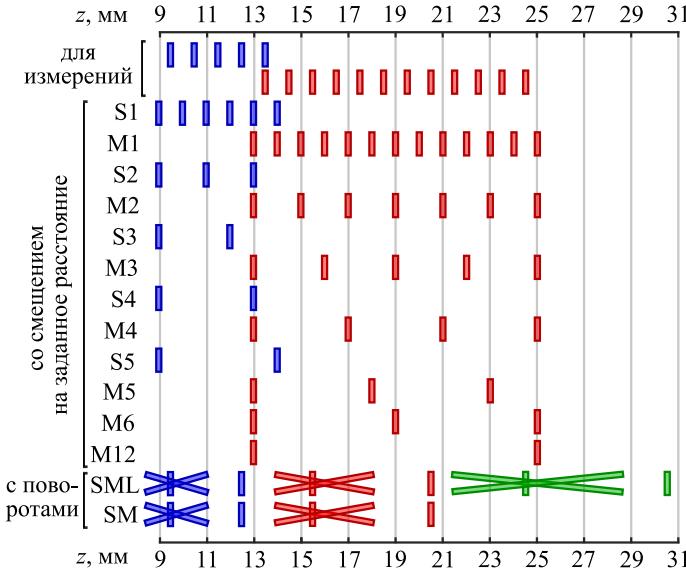


Рисунок 8. Расположение тест-объекта при калибровке и измерениях.

Установлено, что вклад погрешности калибровки в общую погрешность измерений в 30-50 раз меньше по сравнению с вкладом погрешности 2D координат $p_{i,j,k,l}$ при измерениях, если погрешность 2D координат при калибровке меньше или равна погрешности 2D координат при измерениях. Таким образом, в реальных условиях погрешность измерений практически не зависит от количества положений тест-объекта. Также показано, что для перемещения тест-объекта не требуется особо точное оборудование.

допустимая погрешность перемещения тест-объекта вдоль оси z составляет $\pm 0,05$ мм, а допустимый поворот вокруг осей — $\pm 1^\circ$. По итогам моделирования процедура калибровки с двумя положениями тест-объекта (M12 на Рисунке 8) при его смещении на заданное расстояние без поворота выбрана в качестве оптимальной. Результаты моделирования подтверждены результатами экспериментов с изготовленным образцом ОЭС №2 (без спектральной фильтрации) [6, 9].

Для работы в УСИ предложено модифицировать трассировочную ММ, разделив ее параметры на спектрально-зависимые и спектрально-независимые [1, 8, 14, 17]. Калибровка проводится в нескольких заранее выбранных УСИ, полученные изображения обрабатываются совместно для вычисления параметров ММ. При этом спектрально-зависимые параметры имеют разные значения для каждого УСИ, использованного при калибровке; для проведения измерений в других УСИ в пределах рабочего спектрального диапазона ОЭС их значения интерполируются. Спектрально-зависимыми параметрами трассировочной ММ выбраны фокусное расстояние объектива f_u и показатель преломления призмы n . На Рисунке 9 показаны их значения, полученные экспериментально при калибровке ОЭС №1 без спектральной фильтрации (White), в 2 УСИ (C1C6 и C2C5) с линейной интерполяцией, в 3 УСИ (C1C4C6) с интерполяцией по формуле Конради и совместно во всех 6 УСИ (All). Графики для C1C4C6 и All почти совпадают.

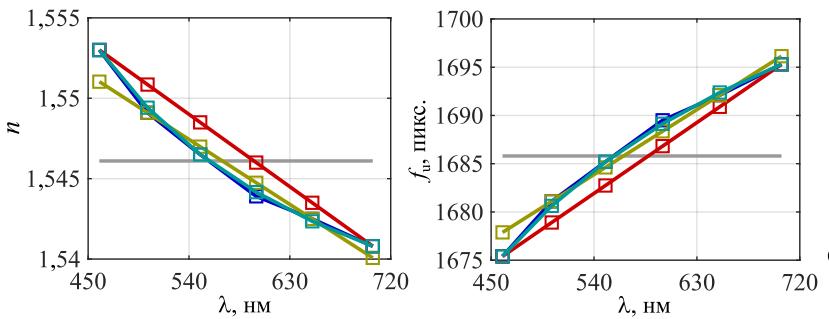


Рисунок 9. Экспериментально полученные значения фокусного расстояния объектива f_u и показателя преломления призмы n .

В процессе моделирования для ОЭС №1 получены оценки систематической погрешности измерений (3D координат точек и длин отрезков) в зависимости от количества и положения УСИ, выбранных для калибровки [8]. Показано, что калибровка трассировочной ММ в одном УСИ или без спектральной фильтрации приводит к систематической погрешности измерения длины поперечных отрезков в других УСИ до 0,1 мм и продольных отрезков до 0,2 мм при номинальной длине 1 мм. Систематическая погрешность измерений при совместной калибровке в 3 УСИ, расположенных на краях и в середине рабочего спектрального диапазона, и последующей интерполяцией совпадает с погрешностью при совместной калибровке во всех 6 УСИ. На Рисунке 10 в верхнем ряду показаны результаты моделирования. В качестве критерия использована сумма модулей средних отклонений измеренной длины отрезка 1 мм по 6 УСИ.

По итогам моделирования калибровка в 3 УСИ с последующей интерполяцией f_u и n выбрана в качестве оптимальной для ОЭС №1. Результаты моделирования подтверждены результатами экспериментов с изготовленным образцом ОЭС №1 (показаны в нижнем ряду на Рисунке 10): систематическая погрешность измерений длин отрезков при совместной калибровке в 3 УСИ (C1C4C6) практически не отличалась от погрешности при калибровке в каждом УСИ по

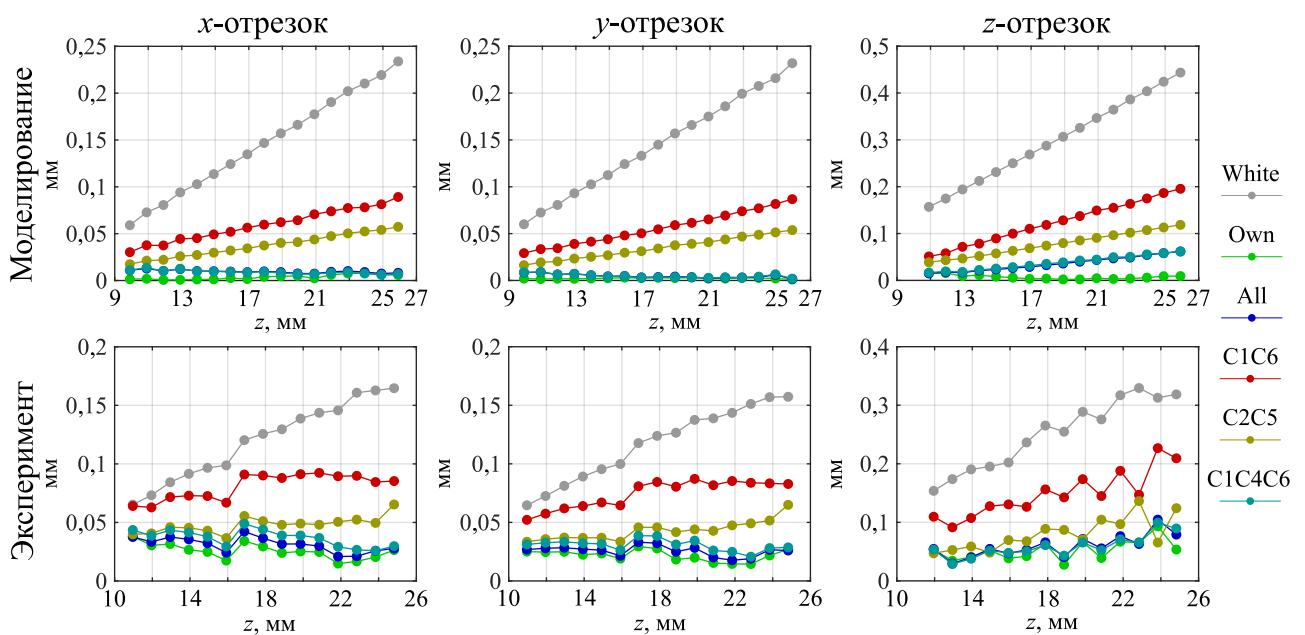


Рисунок 10. Зависимость суммы по 6 УСИ модулей средних отклонений измеренных длин отрезков в 1 мм от расстояния z до объекта.

отдельности (Own) и была как минимум в 3 раза ниже, чем погрешность при калибровке в одном УСИ или без спектральной фильтрации [8, 14, 17]. Для аттестованного металлического объекта показано, что использование калибровки без спектральной фильтрации приводит к разному масштабу и смещению друг относительно друга получаемых в УСИ 3D моделей, чего не происходит при использовании предложенного метода калибровки (Рисунок 11).

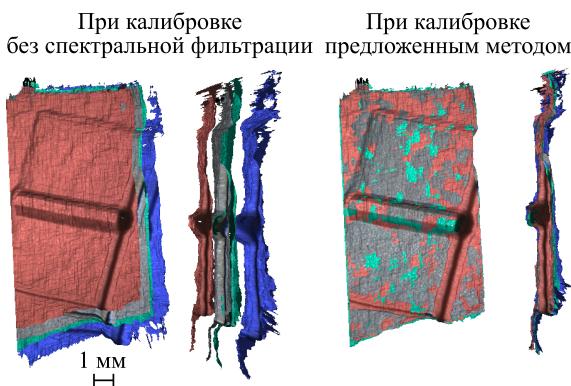


Рисунок 11. 3D модели объекта, полученные при съемке в УСИ и без спектральной фильтрации.

В третьей главе рассмотрены методы цифровой обработки изображений для вычисления координат соответствующих точек и координат маркеров тест-объекта, которые могут быть использованы для трассировочной ММ призменно-линзовой стереоскопической ОЭС.

Ректификация двух изображений заключается в их геометрическом преобразовании, после которого соответствующие точки лежат на одной горизонтальной линии. Такая предварительная обработка требуется для большинства современных ал-

горитмов поиска соответствующих точек и позволяет значительно сократить время их работы. Известные методы ректификации разработаны для проективных ММ и не подходят для трассировочной ММ призменно-линзовой ОЭС, не имеющей единого центра проекции. Для решения этой задачи в работе предложен метод ректификации, использующий обратную трассировку лучей для проекции на промежуточную плоскость в пространстве предметов [13]. Далее полученные точки проецируются на плоскости изображений двух виртуальных камер, описываемых проективными ММ. Поскольку положение промежуточной плоскости влияет на получаемые 2D координаты соответствующих точек на ректифицированных изображениях, при проектировании должен быть проведен анализ и оптимальным образом выбрано положение плоскости.

При компьютерном моделировании для каждой точки при каждом положении тест-объекта были сначала вычислены 2D координаты $\bar{p}_{i,j,k}$ на изображениях, а затем при помощи предложенного метода — 2D координаты $\bar{p}_{r,i,j,k}$ на ректифицированных изображениях при использовании промежуточной плоскости, расположенной параллельно xOy на расстоянии z_{rect} . Для оценки качества ректификации для каждой пары соответствующих точек вычислено вертикальное рассогласование Δv и введен критерий R , равный отношению количества пар с $|\Delta v| < \Delta v_{max}$ к общему количеству пар на изображениях. Результаты для трассировочных ММ с параметрами, полученными при калибровке видеоэндоскопа Mentor Visual iQ и ОЭС №1 [13], показаны на Рисунке 12. Пороговые значения Δv_{max} были выбраны равными 2 и 4 пикселя для Mentor Visual iQ и ОЭС №1 соответственно. Для сравнения приведены результаты, полученные при использовании проективной ММ и известного метода ректификации.

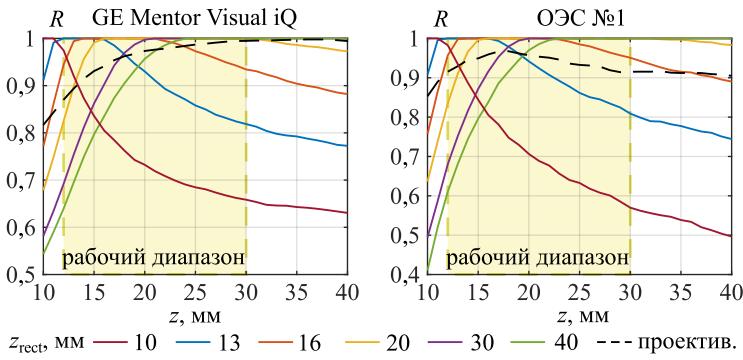


Рисунок 12. Зависимость критерия R от расстояния z до объекта при различных расстояниях z_{rect} до промежуточной плоскости для предложенного метода ректификации и при использовании метода ректификации для проективной ММ («проектив.»).

По итогам моделирования для обеих зондовых призменно-линзовых ОЭС было выбрано оптимальное расстояние z_{rect} , равное 15...16 мм. Результаты моделирования согласуются с экспериментами, в ходе которых оценивалось вертикальное рассогласование для углов клеток тест-объекта в виде шахматной доски и качество 3D моделей для аттестованных металлических объектов [13]. Кроме того, на изображениях этих объектов экспериментально подтверждена правильность выбора пороговых значений Δy_{max} . На Рисунке 13 показаны карты диспаратности (disparity) при искусственно добавленном Δv (вверху) и доля пикселей изображения, значения диспаратности которых при данном Δv отличаются от значений при $\Delta v = 0$ не более, чем на 1 пиксель (внизу). Результаты приведены для нескольких металлических аттестованных объектов (изображения показаны внизу на Рисунке 13). Таким образом, для расстояний до объекта в пределах от 12 до 30 мм и одном оптимально выбранном положении промежу-

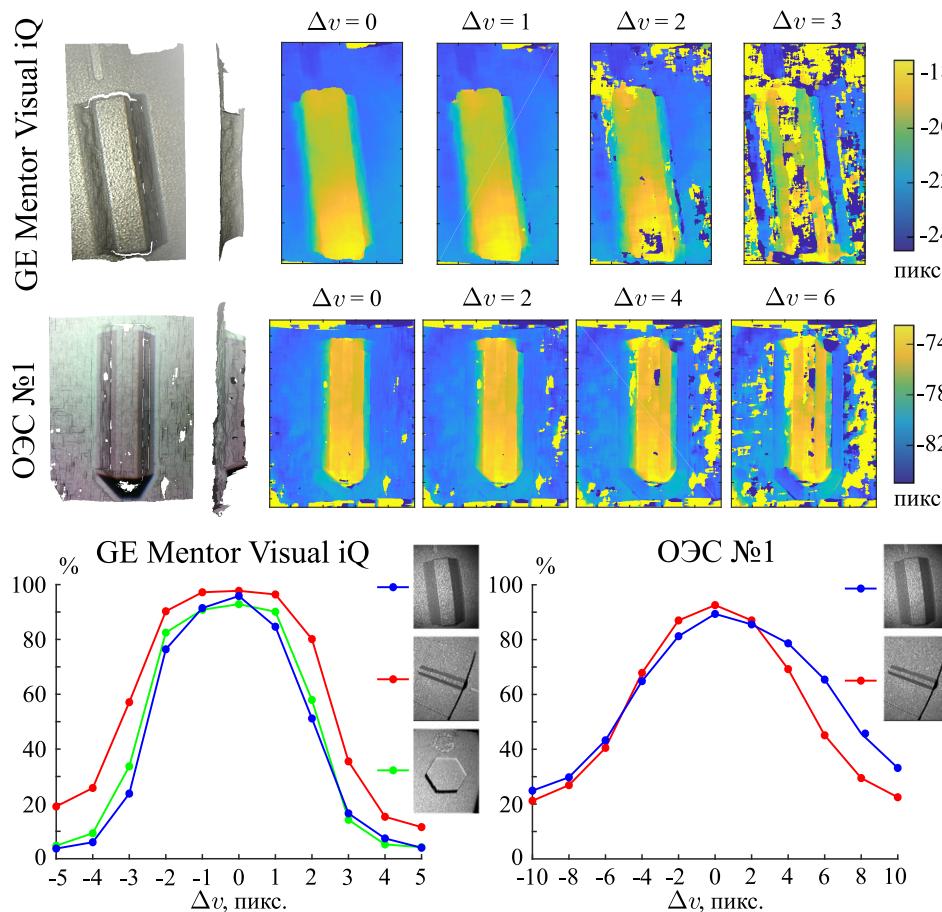


Рисунок 13.
Экспериментально полученные 3D модели (вверху слева) и карты диспаратностей при искусственно добавленном рассогласовании Δv (вверху справа).
Зависимости отношения количества правильно сопоставленных пикселей к их общему количеству на изображении (в %) от рассогласования Δv (внизу).

точной плоскости предложенный метод для трассировочной ММ обеспечивает вертикальное рассогласование не хуже, чем метод ректификации для проективной ММ с отдельной калибровкой параметров этой модели.

Предложенный метод ректификации позволяет избежать отдельной калибровки проективной ММ для ректификации и может быть использован для других ММ ОЭС с обратной трассировкой лучей и не имеющих единого центра проекции, например, для зеркально-линзовых ОЭС. В работе также показано применение метода для ректификации изображений в УСИ при соответствующей калибровке ОЭС [14], что было использовано при получении 3D моделей, показанных на Рисунке 11. Кроме того, разработанный метод калибровки для работы в УСИ можно применить к R, G и B каналам цветного изображения. В этом случае, проводя ректификацию R, G и B каналов по отдельности, можно значительно уменьшить проявление хроматизма на изображениях. Результаты экспериментов с ОЭС №1 и тест-объектом в виде шахматной доски показали, что предложенный метод ректификации позволяет в 3...4 раза снизить смещение точек в R и B каналах изображения по сравнению с G каналом [5].

Для определения координат углов шахматных клеток на изображении используется известный метод подгонки под выделенный фрагмент изображения параметрической модели, в котором функция рассеяния точки (ФРТ) принимается подобной функции Гаусса. Отличием модели, использованной в данной работе, является наличие двух параметров для описания ширины ФРТ вместо одного, что позволяет учесть асимметрию ФРТ, обусловленную аберрациями призменно-линзовой ОС. Для вычисления погрешности координат углов клеток используется приближение первого порядка в окрестности найденного решения (вектора параметров модели). При этом считается, что шум на изображении является аддитивным, некоррелированным и имеет заданное СКО в каждом пикселе. На этапе проектирования применяется компьютерное моделирование, отличающееся от показанного на Рисунке 3 тем, что для каждой точки объекта при помощи САПР дополнительно вычисляется полихроматическая ФРТ. На основе этих данных производится синтез фрагмента изображения, к которому применяется описанный выше метод вычисления координат углов клетки и оценки погрешности. На этапе эксплуатации для регистрируемых изображений дополнительно проводится оценка значения СКО шума.

Эффективность метода подтверждена при помощи компьютерного моделирования методом Монте-Карло как для проективной ММ и параметрически заданной ФРТ, так и для ММ, заданной конструктивными параметрами оптических элементов, и расчете ФРТ для зондовой призменно-линзовой ОЭС №1 в САПР Zemax. Показано, что основными параметрами, которые влияют на погрешность вычисления координат углов клеток, являются размер выделяемых фрагментов изображения и ширина ФРТ. Также показано, что при наличии сильной дисторсии изображения аппроксимация линий клеток кривыми второго порядка позволяет избежать смещения координат угла клетки, но приводит к возрастанию СКО по сравнению с аппроксимацией прямыми линиями. Следова-

тельно, окончательный вывод о предпочтительном использовании той или иной аппроксимации для конкретной ОС нужно делать на основании моделирования с учетом дисторсии и размера области интереса. Работоспособность метода также подтверждена экспериментально для ОС с призмой больших размеров и камерой для машинного зрения с полностью управляемыми параметрами, а также для опытного образца ОЭС №1 с МПИ без байеровского фильтра.

Таким образом, предложен и реализован метод, позволяющий оценить погрешность координат маркеров тест-объекта (углов клеток) на изображениях при заданных параметрах ОЭС с учетом ее aberrаций и отношения сигнал/шум. За счет применения данного метода на этапе эксплуатации могут быть повышенны надежность калибровки и аттестации стереоскопических измерительных приборов, а также оценена погрешность каждого проводимого измерения в режиме, близком к режиму реального времени.

В четвертой главе изложено применение разработанных методов в методике проектирования стереоскопических измерительных приборов с зондовыми призменно-линзовыми ОС. На системотехническом уровне проектирования проводится упрощенное моделирование с использованием геометрооптической ММ ОЭС и метода оценки погрешности, рассмотренного в первой главе. Полученные параметры геометрооптической ММ ОЭС и параметры, описывающие ФРТ, являются исходными данными для проектирования ОЭС регистрации изображений на схемотехническом уровне. На этом уровне проводится совместное моделирование ОС и алгоритмов обработки данных согласно схеме, показанной на Рисунке 14. При этом используется ММ ОС в САПР, заданная конструктивными параметрами оптических элементов, что позволяет анализировать влияние допусков на изготовление компонентов и сборку ОС, темпе-

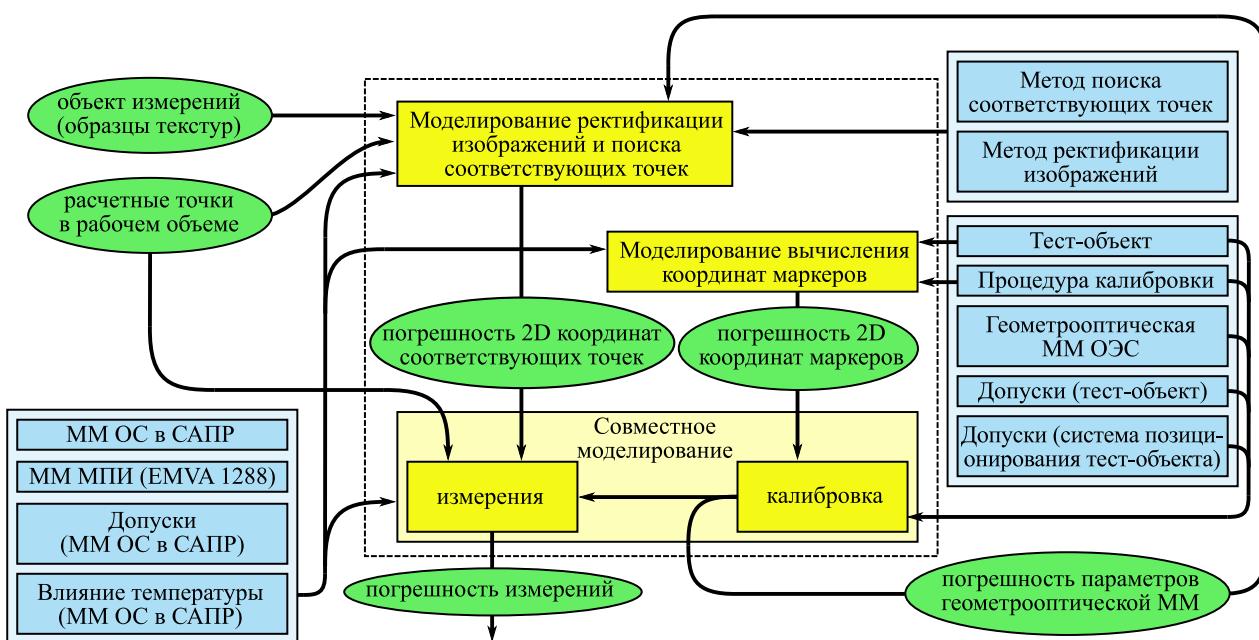


Рисунок 14. Структурная схема для выполнения проектных процедур на схемотехническом уровне.

ратуры и других факторов на погрешности измерений 2D координат соответствующих точек и особых точек маркеров тест-объекта, 3D координат точек и геометрических параметров.

Полученные результаты позволяют использовать плоский тест-объект в виде шахматной доски и оборудование для его перемещения как для проведения геометрической калибровки, так и для проведения аттестации и поверки 3D измерений. Для ОЭС №1 и №2 экспериментально показано, что тот же тест-объект может быть использован для проведения аттестации и поверки качества изображения по результатам измерения модуляционной передаточной функции стандартизованным методом пограничной кривой. Используя предложенные методы, становится возможным разработать универсальное оборудование для калибровки и поверки, а также обеспечить совпадение расчетных точек на разных этапах проектирования и точек измерения при аттестации.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертации реализован системный подход к проектированию стереоскопических измерительных приборов с зондовыми призменно-линзовыми ОС, который основан на следующих научных и практических результатах:

- Разработана методика проектирования стереоскопических измерительных систем на основе совместного компьютерного моделирования аппаратной части, алгоритмов обработки данных, а также процедур, используемых для калибровки и аттестации.
- Разработан метод интервальной оценки погрешности стереоскопических измерений геометрических параметров, позволяющий учесть априорную информацию о форме контролируемой поверхности и относительном положении зонда и средствами САПР производить оптимизацию конструктивных параметров ОЭС.
- Разработана трассировочная ММ для призменно-линзовой ОЭС видеоэндоскопа и методика калибровки ее параметров в нескольких УСИ с последующей интерполяцией спектрально-зависимых параметров в других интервалах.
- Разработан метод ректификации изображений для трассировочной ММ призменно-линзовой ОЭС и способ оптимального выбора его параметров.
- Разработан метод оценки погрешности измерения координат маркеров на изображениях тест-объекта в виде шахматной доски, который может применяться как на этапе проектирования стереоскопических измерительных систем, так и при их эксплуатации.
- Методика проектирования апробирована при разработке зондовой призменно-линзовой ОЭС, для которой осуществлен оптимальный выбор геометрооптической ММ и оптимизированы параметры процедуры и оборудования для калибровки.
- Теоретические положения диссертации подтверждены численным моделированием и результатами экспериментальных исследований на серийно выпуск-

каемых и вновь разработанных стереоскопических видеоэндоскопах с призменно-линзовыми ОС.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Мачихин А. С., Горевой А. В., Хохлов Д. Д. Метод повышения точности геометрических измерений, проводимых с помощью стереоскопического устройства на основе призменно-линзовой оптической системы // Патент RU 2 693 532. Выдан 03.07.2019.
2. Триангуляционный метод измерения площади участков поверхности внутренних полостей объектов известной формы / А. В. Горевой [и др.] // Патент RU 2 655 479 С1. Выдан 28.05.2018.
3. Горевой А. В., Кузнецов А. О., Мачихин А. С. Программа для расчета геометрических преобразований, описывающий формирование изображения призменно-линзовыми стереоскопическими системами // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614879 от 02.07.2018.
4. Горевой А. В., Кузнецов А. О., Мачихин А. С. Программный комплекс для создания трехмерной модели поверхности по изображениям, полученным призменно-линзовой стереоскопической системой // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616535 от 01.06.2018.
5. *3D imaging endoscopy using small-size prism-based stereo systems* / A. V. Gorevoy [et al.] // Proc. SPIE. 2020. Vol. 11433. P. 526–532. (0,79 п.л./0,2 п.л.).
6. *Modeling and optimization of a geometrical calibration procedure for stereoscopic video endoscopes* / A. V. Gorevoy [et al.] // J. Opt. Soc. Am. A. 2019. Vol. 36, no. 11. P. 1871–1882. (1,33 п.л./0,8 п.л.).
7. *Calibration simulation for stereoscopic optical systems using optical design software* / A. V. Gorevoy [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1368. P. 022010. (0,84 п.л./0,5 п.л.).
8. Khokhlov D. D., Gorevoy A. V., Machikhin A. S. Applying computer simulation using optical design software to multi-spectral geometrical calibration of stereoscopic measurement systems // Proc. SPIE. 2019. Vol. 11061. P. 81–92. (1,34 п.л./0,53 п.л.).
9. *Optimization of a geometrical calibration procedure for stereoscopic endoscopy systems* / A. V. Gorevoy [et al.] // Proc. SPIE. 2019. Vol. 11056. P. 741–750. (1,07 п.л./0,64 п.л.).
10. *Optimization of stereoscopic imager performance by computer simulation of geometrical calibration using optical design software* / A. V. Gorevoy [et al.] // Opt. Express. 2019. Vol. 27, no. 13. P. 17819–17839. (2,37 п.л./1,43 п.л.).
11. *Миниатюрный стереоскопический объектив для измерения геометрических параметров труднодоступных технических объектов* / А. В. Горевой [и др.] // Оптический журнал. 2019. Т. 86, № 6. С. 45–49. (0,54 п.л./0,1 п.л.).
12. *Compact stereoscopic prism-based optical system with an improved accuracy of 3-D geometrical measurements* / A. V. Gorevoy [et al.] // Optik. 2019. Vol. 185.

Р. 1172–1181. (1,12 п.л./0,23 п.л.).

13. Kuznetsov A. O., Gorevoy A. V., Machikhin A. S. Image rectification for prism-based stereoscopic optical systems // *Computer Vision and Image Understanding*. 2019. Vol. 182. P. 30–37. (0,92 п.л./0,37 п.л.).
14. Modification of calibration and image processing procedures for precise 3-D measurements in arbitrary spectral bands by means of a stereoscopic prism-based imager / A. V. Gorevoy [et al.] // *Optical Engineering*. 2019. Vol. 58, no. 3. P. 1–12. (1,35 п.л./0,54 п.л.).
15. A miniature prism-based stereoscopic system for 3D machine vision applications / A. V. Gorevoy [et al.] // *Proc. SPIE*. 2019. Vol. 11041. P. 162–167. (0,6 п.л./0,09 п.л.).
16. Горевой А. В., Мачихин А. С., Колючкин В. Я. Оценка погрешности измерения геометрических параметров объектов при проектировании // *Компьютерная оптика*. 2018. Т. 42, № 6. С. 985–997. (1,47 п.л./1,03 п.л.).
17. Calibration of a stereoscopic video endoscope for precise three-dimensional geometrical measurements in arbitrary spectral bands / A. V. Gorevoy [et al.] // *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10677. P. 85–90. (0,64 п.л./0,25 п.л.).
18. Gorevoy A. V., Machikhin A. S. Optimal calibration of a prism-based videoendoscopic system for precise 3D measurements // *Computer Optics*. 2017. Vol. 41, no. 4. P. 535–544. (1,1 п.л./0,77 п.л.).
19. Применение трассировочной модели оптико-электронной системы для повышения точности стереоскопических эндоскопических измерений / А. В. Горевой [и др.] // *Дефектоскопия*. 2017. № 9. С. 44–53. (1,07 п.л./0,54 п.л.).
20. Gorevoy A. V., Machikhin A. S. Ray-tracing camera model for precise three-dimensional measurements using a prism-based endoscopic probe // 14th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering / Ed. by T. Kek, J. Grum. Slovenian Society for Non-Destructive Testing, 2017. P. 87–94. (1,02 п.л./0,61 п.л.).
21. Machikhin A. S., Gorevoy A. V. Calibration of miniature prism-based stereoscopic imagers for precise spatial measurements // *Proc. SPIE*. 2016. Vol. 9917. P. 33–42. (1,13 п.л./0,56 п.л.).
22. Gorevoy A. V., Machikhin A. S. Method to improve the accuracy of the geometrical parameters measurement in stereoscopic AOTF-based spectral imagers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 584. P. 012004. (1,27 п.л./0,76 п.л.).
23. Горевой А. В., Мачихин А. С., Перфилов А. М. Определение погрешности бесконтактного измерения площади дефектов на поверхностях сложной формы при видеоэндоскопическом контроле // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 4 (92). С. 140–148. (0,94 п.л./0,56 п.л.).

Горевой Алексей Владимирович

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук на тему:
СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ С ЗОНДОВЫМИ ПРИЗМЕННО-ЛИНЗОВЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ
СИСТЕМАМИ

Усл. печ. л. 1,155. Тираж 80 экз. Заказ 20/2.

Отпечатано 27.03.2020 в НТЦ УП РАН.
117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 15.