

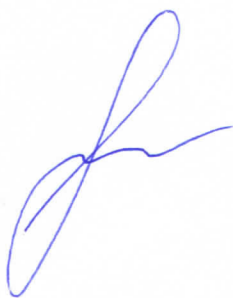
На правах рукописи
УДК 621.373.826

Гладышева Яна Владимировна

**МЕТОД И АППАРАТУРА ДИНАМИЧЕСКОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ
ДЕТАЛЕЙ**

Специальность 05.11.07
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем

Научный **Барышников Николай Васильевич**

руководитель: доктор технических наук, доцент

Официальные **Мачихин Александр Сергеевич,**

оппоненты: доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
акустооптической спектроскопии НТЦ УП РАН

Азарова Валентина Васильевна,

Кандидат физико-математических наук, доцент,
начальник отдела Научно-исследовательского
института "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха

Ведущая **АО «Лыткаринский завод оптического стекла»**
организация:

Защита состоится «__» _____ 2019 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «__» _____ 201__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



М.С. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время большой интерес вызывают задачи по созданию таких оптико-электронных приборов как большие оптические телескопы, сверхмощные лазерные установки и гравитационные телескопы. Существует несколько международных проектов, таких, как: европейский сверхбольшой телескоп (The European Extremely Large Telescope - E-ELT) в Чили, американо-австралийский гравитационный телескоп LIGO и сверхмощный лазер NIF. Оптические схемы подобных систем включают высокоточные крупногабаритные оптические детали, размеры которых достигают 1 метра и более при качестве поверхности до 0,2 нм RMS (среднеквадратическое отклонение высот по поверхности). Такое качество поверхности обеспечивает снижение влияния ее светорассеивающих характеристик на результаты работы всей системы.

Современные технологии, например, технологии ионного полирования, позволяют производить оптические детали, у которых СКО высот микронеровностей профиля поверхности не превышает нанометра и даже доли нанометра. Вместе с тем встает вопрос о разработке методик контроля качества таких поверхностей.

Важной особенностью измерения качества поверхности крупногабаритной оптики является то, что ее необходимо контролировать в процессе производства. Вес контролируемой детали может достигать нескольких сот килограммов, что делает невозможным перемещение детали, так как это может привести к эффекту «перетекания материала», а значит - к изменению формы поверхности, толщины детали. В связи с этим, контроль поверхности проводится в производственных условиях и связан с присутствием вибраций, которые влияют на качество измерения. Частота вибраций на оптическом производстве составляет порядка 1 кГц, поэтому методы и оборудование контроля параметров качества крупногабаритной оптики должны обладать свойством виброустойчивости. В настоящее время для контроля подобных оптических поверхностей используются динамические интерферометрические методы. Они обеспечивают регистрацию интерференционной картины за очень малое время, менее 200 мкс. Достигается это за счет использования высокоскоростной видеосъемки, или аппаратуры, позволяющей одновременно регистрировать несколько интерферограмм с помощью поляризационной селекции (интерферометр NanoCam, 4D Technology), или с помощью нескольких синхронизированных камер (интерферометр Intellium, ESDI).

Работы в указанном направлении в настоящее время ведутся и в нашей стране и за рубежом. Среди отечественных организаций следует отметить ОАО «ЛЗОС», МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГУП Конструкторско –

технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения РАН, а среди зарубежных фирм – «Zygo», «4D technology», «Mahr».

Наряду с очевидными успехами, связанными с разработкой интерферометрических приборов, в настоящее время существует ряд нерешенных проблем, сдерживающих развитие методов и аппаратуры контроля высокоточных крупногабаритных оптических деталей. К ним можно отнести:

- не сформулированы требования к интерферометрической аппаратуре, обеспечивающей контроль деталей в широком пространственно-частотном диапазоне;
- не разработаны алгоритмы и программное обеспечение методов абсолютной калибровки при контроле крупногабаритных оптических деталей;
- не исследованы точностные характеристики алгоритмов и аппаратуры контроля.

Кроме того, все используемые интерференционные методы измерения качества оптических поверхностей требуют использования высокоточных крупногабаритных эталонов. Изготовление таких эталонов само по себе является сложной задачей, поскольку погрешности поверхности таких эталонов должны быть на порядок меньше, чем у контролируемых деталей.

В этой связи тема диссертационной работы «Метод динамической интерферометрии и аппаратура для контроля качества поверхности крупногабаритных оптических деталей» является актуальной.

Целью работы является разработка методов динамической интерферометрии и аппаратуры для высокоточного контроля качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей в широком пространственно-частотном диапазоне их неоднородностей.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие основные **научно – технические задачи**:

1. Провести анализ неоднородностей оптических поверхностей и на его основе разработать классификацию неоднородностей по пространственно-частотным диапазонам;
2. Провести исследование существующих методов контроля качества оптических поверхностей и сформулировать требования к перспективному методу контроля крупногабаритных оптических деталей;
3. Разработать метод динамической интерферометрии для контроля качества оптических поверхностей крупногабаритных оптических деталей, основанный на пространственно-частотном анализе топограммы поверхности;
4. Разработать методику исследования погрешностей предложенного метода контроля качества крупногабаритных оптических поверхностей;

5. Устранить влияние погрешностей эталонной поверхности в процессе контроля качества крупногабаритных оптических поверхностей;

5. Создать интерферометрическую аппаратуру контроля качества поверхности, обеспечивающую регистрацию неоднородностей в заданном пространственно-частотном диапазоне;

6. Провести экспериментальные исследования качества оптической поверхности, подтверждающие теоретические положения, сформулированные в диссертации, а также точностные характеристики разработанной аппаратуры;

Объектом исследования являются неоднородности поверхности крупногабаритных оптических деталей.

Предметом исследования являются методы динамической интерферометрии для контроля качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей.

Методы и средства исследований. При решении прикладных и теоретических задач были использованы методы математической статистики, методы математического моделирования, экспериментальные методы исследований, элементы теории оптических и оптико-электронных систем.

Научная новизна

- обоснована возможность высокоточного контроля качества поверхности оптических крупногабаритных деталей в производственных условиях за счет использования метода динамической интерферометрии и модифицированной методики абсолютной калибровки измерений.

- обоснована необходимость проводить измерение качества поверхностей оптических деталей без влияния погрешностей эталонной поверхности.

- разработана модифицированная методика абсолютной калибровки интерферометрических измерений, позволяющая повысить точность измерений параметров неоднородности поверхности крупногабаритной оптической детали за счет исключения погрешностей эталонной поверхности.

- разработана методика исследования погрешностей метода контроля качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей позволяет обосновать требования к техническим характеристикам интерферометрической аппаратуры для обеспечения заданной точности измерений в заданном пространственно-частотном диапазоне неоднородностей.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Использование метода динамической интерферометрии с модифицированной методикой абсолютной калибровки обеспечивает контроль качества поверхности крупногабаритных оптических деталей в

широком пространственно-частотном диапазоне неоднородностей в производственных условиях с погрешностью не более 1 нм.

- методика исследования погрешностей метода контроля качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей обеспечивает погрешность измерения в заданном пространственно-частотном диапазоне параметров неоднородностей.

- Оптическая схема разработанной телескопической насадки к интерферометру позволяет проводить регистрацию топограммы поверхности оптической детали диаметром до 1 м.

Практическая значимость

- Разработан Программный комплекс, используемый в производственных условиях для контроля качества поверхности крупногабаритных оптических деталей;

- Разработана аппаратура для измерения топограммы оптической поверхности, использующая методику абсолютной калибровки интерферометра в широком пространственно-частотном диапазоне.

Достоверность

Достоверность результатов основана на корректном применении методов статистической оптики, теории оптико-электронных систем, подтверждена многочисленными экспериментальными исследованиями.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы представлялись на 19-ой и 20-ой научно-технических конференциях «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение» (ФГУП «ВНИИОФИ», Москва, 2013, 2015гг.), 6-ой и 8-ой Научно-технических конференциях молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО», (Москва, ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», 2013-2014гг.), Научно-практической конференции «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования», (Лыткарино, ОАО ЛЗОС, 2014г.), Международной научной конференции «Физико-математические проблемы создания новой техники» (Москва. МГТУ им. Н.Э. Баумана, PhysMathTech, 2014г.), Всероссийской научно-технической конференции "Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении" (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО «Швабе», 2016г.), Научно-практической конференции "Оптико-электронные приборы и комплексы" (Красногорск, ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», АО «Швабе», 2017г.), Десятой всероссийской конференции "Необратимые процессы в природе и технике" (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019г.).

Внедрение результатов диссертационной работы

Разработанные метод и аппаратура динамической интерферометрии для контроля качества поверхности крупногабаритных оптических деталей внедрены в производственный процесс АО «Лыткаринский завод оптического стекла». Внедрение результатов диссертационной работы подтверждается соответствующими актами.

Публикации

Основные результаты опубликованы в 5 статьях, в том числе в 4 статьях в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 4 из которых входят в международную базу Scopus.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержащего 89 библиографических описаний цитируемых источников. Диссертация изложена на 168 страницах машинописного текста, включает 76 рисунков и 32 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научной задачи, решаемой в диссертационной работе, сформулированы цель и задачи исследований, дана краткая характеристика работы по главам.

В первой главе был проведен анализ неоднородностей оптической поверхности и по его результатам определены диапазоны (низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные неоднородности), присутствующих на оптической поверхности неоднородностей и рассмотрены основные характеризующие параметры качества оптической поверхности: среднеквадратическое значение отклонения точек для двумерного профиля, максимальное расстояние (размах) между высотой наибольшего выступа и глубиной наибольшей впадины относительно среднего уровня профиля поверхности. Определено понятие качества поверхности крупногабаритных оптических деталей, как совокупность низкочастотных и высокочастотных неоднородностей на поверхности оптической детали, сформированных в результате технологической обработки поверхности на стадиях шлифования и полирования, не включающих форму поверхности.

В работе показано, что для контроля качества крупногабаритных оптических деталей перспективным является метод, основанный на использовании пространственно-частотного представления неоднородностей. В соответствии с этим подходом все микронеровности классифицируются по пространственным частотам. Для оценки качества поверхности в пространственно-частотном диапазоне используется такой параметр качества поверхности, как спектральная плотность мощности корреляционной функции (PSD). Согласно теореме Хинчина – Винера, одномерная функция определяется как:

$$PSD(v_x) = \mathfrak{F}\{Kr_h(x)\} = \mathfrak{F}\left\{M\left[\overset{\circ}{h}(x_1)\overset{\circ}{h}(x_1+x)\right]\right\},$$

где $\mathfrak{F}\{ \}$ - оператор Фурье – преобразования; $Kr_h(x)$ - автокорреляционная функция; $M[\]$ - математическое ожидание случайной центрированной функции распределения высот исследуемого профиля $\overset{\circ}{h}(x)$; $x_1, x_1 + x$ - координаты точек на поверхности исследуемого профиля. Существует

математическая зависимость между величиной среднеквадратического отклонения S_q высот профиля оптической поверхности от средней линии и функцией PSD:

$$S_q = \frac{1}{D} \sqrt{\int_{v_{xmin}}^{v_{xax}} \int_{v_{ymin}}^{v_{ymax}} PSD(v_x, v_y) dv_x dv_y}$$

Где v_x, v_y – пространственные частоты; $v_{min} = 1/L$ – минимальная пространственная частота, $[mm^{-1}]$; L – линейный размер поля, регистрируемого (измеряемого) прибором; $v_{max} = 1/a$ – максимальная пространственная частота, удовлетворяющая теореме Котельникова $[mm^{-1}]$; a – размер пикселя ПЗС камеры, $[mm]$; D – апертура исследуемой поверхности, $[mm]$.

В работе предложены классы неоднородностей на оптической поверхности с их разделением на четыре пространственно-частотных диапазона (Таблица 1). Поскольку размер контролируемой детали может быть любым, то необходима универсальная зависимость между размером апертуры и типом неоднородности на поверхности детали. Такая связь может быть найдена, если использовать гармоническое представление неоднородностей. Суть этой методики заключается в том, что все неоднородности представляются в виде гармоник различного порядка. Поскольку гармоники связаны с размером детали, то 1 гармоника нормируется на диаметр D , поэтому порядок гармоник остается одинаковым для различных апертур.

Таблица 1.

Диапазоны неоднородностей крупногабаритных оптических поверхностей высокой точности

Диапазон	I	II	III	IV
Классы неоднородностей	Низкочастотные	Среднечастотные		Высокочастотные
Формула расчета диапазона гармоник	$\frac{D}{33} - \frac{D}{33}$	$\frac{D}{33} - \frac{D}{2,5}$	$\frac{D}{2,5} - \frac{D}{0,12}$	$\frac{D}{0,12} - \frac{D}{0,01}$
Диапазон гармоник	1-13	13-180	180-3750	3750–45000
Контролируемый параметр	S_q , нм	S_q , нм	S_q , нм	S_q , нм
Требуемое значение параметра, нм	2,5	1,8	1,1	0,4

Предложенная классификация неоднородностей позволяет разработать функциональные схемы аппаратуры контроля для каждого спектрального диапазона.

Для 4-го диапазона предлагается использовать микроинтерферометр по типу Линника. В его схему входит микрополяризационная маска,

которая регистрирует за 1 измерение 4 интерферограммы. Это позволяет исключить влияние внешних вибраций на результаты измерений.

Для 2 и 3-го диапазонов предлагается использовать интерферометр, позволяющий регистрировать интерферограммы за счет трех синхронизированных камер, что также позволяет исключить влияние вибраций в производственных условиях на результаты измерений.

Для решения задачи контроля крупногабаритных оптических деталей для 1-ого диапазона в работе была разработана расширяющая насадка для обеспечения высокой точности измерения. Оптическая схема представлена на Рисунке 1. Важным параметром схемы является расстояние между эталоном и возвратным зеркалом, допустимое значение величины расстояния между эталонной поверхностью и возвратным зеркалом должно не превышать заданного условия на основе габаритного расчета:

$$L \leq \frac{4 \cdot D \cdot f' \cdot \Delta}{n \cdot (4f'^2 - \Delta^2)},$$

где Δ – расстояние между источниками излучения; f' – фокусное расстояние сферического зеркала. Отличительной особенностью разработанной схемы является возможность контролировать качество не только оптической поверхности, но и материала на проход излучения. На данное изобретение в ходе работы был получен патент.

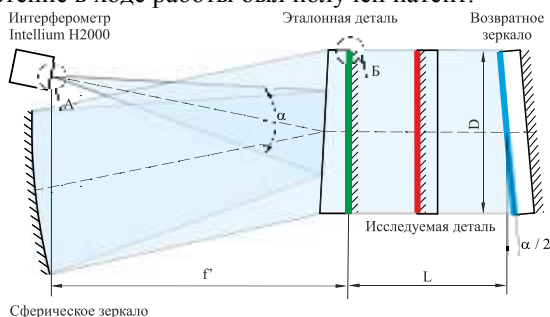


Рисунок 1. Функционально-оптическая схема измерения крупногабаритных оптических поверхностей

Во второй главе обоснована необходимость проводить измерение качества поверхностей оптических деталей без влияния погрешностей эталонной поверхности. В связи с этим в работе был предложен модифицированный метод абсолютной калибровки интерферометра на основе метода двух плоскостей, который позволяет контролировать качество поверхностей крупногабаритных оптических деталей.

Исследуемая деталь контролируется в схеме интерферометра Физо при перемещении исследуемой поверхности относительно эталонной в вертикальном и горизонтальном направлениях относительно оптической оси. Эталонная поверхность неподвижна во время измерений, а

исследуемая поверхность перемещается относительно эталонной вдоль горизонтальной оси на $T/2$ влево и на $T/2$ вправо, вдоль вертикальной оси вверх на $T/2$ и вниз на $T/2$. Четырем измерениям исследуемой поверхности соответствует функция $m_i(x, y)$:

$$\begin{bmatrix} m_1(x, y) \\ m_2(x, y) \\ m_3(x, y) \\ m_4(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_{reference}(-x, y) \\ h_{test}(x + \frac{T}{2}, y) \\ h_{test}(x - \frac{T}{2}, y) \\ h_{test}(x, y + \frac{T}{2}) \\ h_{test}(x, y - \frac{T}{2}) \end{bmatrix},$$

где $h_{reference}(-x, y)$ и h_{test} - распределение высот на поверхностях эталонной и исследуемой поверхностях, а T – величина перемещения детали.

Восстановление распределения высот неоднородностей на исследуемой поверхности вычисляется с помощью Фурье-анализа профиля поверхности:

$$\begin{aligned} h_{test}(x, y) &= \\ &= \frac{1}{2i\pi(v_x^2 + v_y^2)} \left[\iint (v_x \iint \text{Diff}_x(x, y) e^{-2i\pi(v_x x + v_y y)} dx dy) e^{-2i\pi(v_x x + v_y y)} dx dy \right. \\ &\quad \left. + \iint (v_y \iint \text{Diff}_y(x, y) e^{-2i\pi(v_x x + v_y y)} dx dy) e^{-2i\pi(v_x x + v_y y)} dx dy \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{где } \text{Diff}_x(x, y) &= \frac{m_1(x, y) - m_2(x, y)}{T} = \\ &= \iint 2i\pi v_x \text{sinc}(\pi v_x T) \hat{h}_{test}(v_x, v_y) e^{2i\pi(v_x x + v_y y)} dv_x dv_y; \\ \text{Diff}_y(x, y) &= \frac{m_3(x, y) - m_4(x, y)}{T} = \\ &= \iint 2i\pi v_y \text{sinc}(\pi v_y T) \hat{h}_{test}(v_x, v_y) e^{2i\pi(v_x x + v_y y)} dv_x dv_y, \end{aligned}$$

где v_x, v_y – пространственные частоты;

$\text{Diff}_x(x, y), \text{Diff}_y(x, y)$ – разница между измерениями, нормированная на модуль T ;

$\hat{h}_{test}(v_x, v_y)$ – прямое Фурье-преобразование от распределения высот исследуемой поверхности относительно частот v_x, v_y . На Рисунке 2 представлен характерный вид топограммы измеренной поверхности при помощи метода абсолютной калибровки интерферометра.

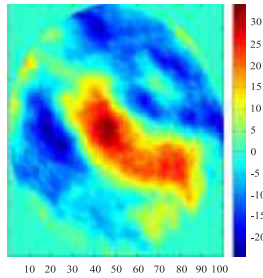


Рисунок 2. Характерный вид топограммы поверхности исследуемой детали

На основе предложенного метода в диссертационной работе был разработан алгоритм и программный комплекс, который реализует этот алгоритм абсолютной калибровки интерферометра. С их помощью проанализировано влияние величины перемещения T на погрешность измерений для разных пространственно-частотных диапазонов неоднородностей.

В работе была предложена методика исследования погрешностей разработанного метода контроля качества крупногабаритных оптических поверхностей и программного комплекса его реализующего. В рамках данной методики на первом этапе была определена теоретическая погрешность метода абсолютной калибровки интерферометра по методу двух плоскостей на примере одной гармоники. В качестве исследуемого профиля поверхности задавалась функция одномерной гармонической функции:

$$h_{test}(n, x) = \sin(2\pi \frac{n}{D} x)$$

где n - номер гармоники, D - апертура, на которой эта гармоника строилась. Восстановленный профиль исследуемой поверхности, рассчитанный с помощью модифицированного алгоритма абсолютной калибровки:

$$h_{test\ восст}(n, x) = \text{sinc}\left(\pi \frac{n}{D} T\right) \sin\left(2\pi \frac{n}{D} x\right).$$

Теоретическая погрешность метода абсолютной калибровки интерферометра по методу двух плоскостей рассчитывается как

$$\Delta = \frac{S_q - S_{q\text{алг}}}{S_q} = 1 - \text{sinc}\left(\pi \frac{n}{D} T\right),$$

где $S_{q\text{алг}}$ - среднеквадратическое значение отклонения точек восстановленного профиля исследуемой поверхности $h_{test\ восст}(n, x)$. На Рисунке 3 показана зависимость теоретической погрешности метода абсолютной калибровки интерферометра по методу двух плоскостей от величины перемещения и диапазона гармоник. На Рисунке 3 светлая

область показывает диапазон гармоник, который будет восстановлен с наименьшей погрешностью, менее 1%, а диапазон перемещений составил 0,2мм – 15мм. Проведённый анализ теоретической погрешности показал, что данный метод в идеальных условиях, без учета приборной погрешности интерферометра, а также погрешности алгоритма восстановления исходного профиля поверхности, позволяет определить диапазон перемещений T , для которого заданная гармоника восстанавливается с заданной погрешностью.

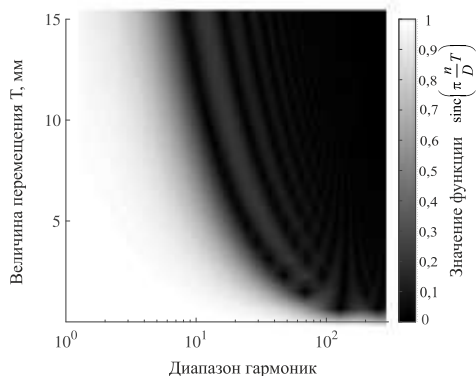


Рисунок 3. Зависимость значения функции $[1 - \text{sinc}(\pi \frac{n}{D} T)]$ от диапазона гармоник и величины перемещения T

На втором этапе исследовались погрешности алгоритма абсолютной калибровки для типовой поверхности, характерной для определенного производства. Такое исследование учитывает проведение проверок на математических моделях и при помощи численного моделирования. В рамках этого исследования был проведен численный эксперимент, позволяющий определить погрешность алгоритма абсолютной калибровки (Рисунок 4). Значение исследуемой погрешности составило $\Delta < 5\%$. Это свидетельствует о том, что требования к качеству эталона не обязательно высокие, так как изображение эталона вычитается.

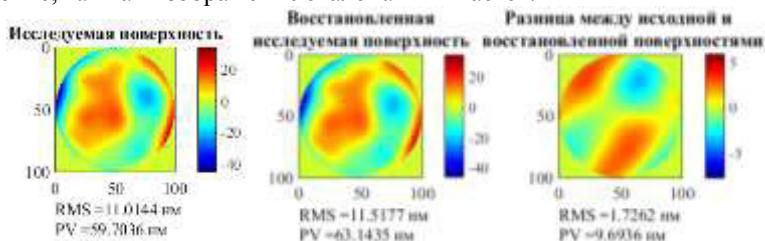


Рисунок 4. Исходная исследуемая поверхность (слева) h_{test} , восстановленная исследуемая поверхности $h_{test\text{восст}}$ (по центру), XOY и разница между исходной и восстановленной исследуемой поверхностями

В результате исследований второй главы определен диапазон перемещения T для заданной погрешности. В частности, показано, что для погрешности $\Delta < 5\%$ диапазон перемещения составляет $T = 1-7$ мм при числе пикселей $N = 1024$ и апертуре детали 100 мм.

Таким образом, во второй главе проведены исследования, позволяющие определить требования к аппаратуре и условиям проведения эксперимента для обеспечения требуемой точности измерения.

В третьей главе для экспериментального подтверждения результатов теоретических исследований первой и второй глав была разработана аппаратура контроля качества оптической поверхности применительно ко всем выделенным пространственно-частотным диапазонам. Стенд для контроля I диапазона (Рисунок 5), разработан на основе функциональной схемы Рисунок 1 в 1 Главе (Таблица 2). На данном стенде была получена топограмма исследуемой поверхности диаметром 720 мм (Рисунок 6). Эта топограмма представляет собой суперпозицию 2х топограмм – эталонной и исследуемой. По данным топограммы были проведены измерения СКО, показано, что даже в I диапазоне можно измерять неоднородности размером до 8,3 нм. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют об эффективности разработанного метода абсолютной калибровки и использовании широкоапертурной насадки.



Рисунок 5. Внешний вид аппаратуры контроля качества крупногабаритных оптических поверхностей высокой точности в I-II диапазонах неоднородностей

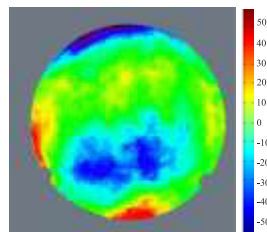


Рисунок 6. Топограмма поверхности, полученная при измерении детали диаметром 720 мм

Таблица 2.

Технические характеристики аппаратуры для контроля качества поверхностей в низкочастотном диапазоне

Параметр	Значение
Длина волны, нм	633
Диаметр апертуры, мм	450-1000

Точность измерений (СКО), нм	$< \lambda/15$
Стабильность измерений, нм	$< \lambda/100$
Диапазон неоднородностей	1
Диапазон перемещения	2-20мм

Проведены экспериментальные исследования аппаратуры для II – III пространственно-частотного диапазона (Рисунок 7). В рамках данного этапа было исследовано влияние отношения сигнал/шум конкретной аппаратуры на диапазон перемещения Т, при котором обеспечивается необходимая погрешность измерений. Отношение сигнал/шум для одного измерения можно записать как:

$$SNR_{m1}(v) = \frac{PSD_{m1}(v)}{\sqrt{2PSD_{noise}(v)}}$$

где $PSD_{noise}(v)$ - спектральная плотность мощности шума на указанном диапазоне частот, $PSD_{m1}(v)$ - является спектральной плотностью корреляционной функции на этом пространственно-частотном диапазоне. Данные параметры рассчитываются исходя из экспериментальных данных для каждого измерительного стенда или аппаратуры отдельно.



Рисунок 7. Внешний вид стенда для измерения неоднородностей II – III пространственно-частотного диапазона

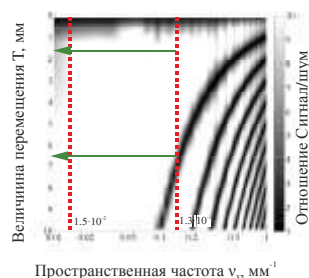


Рисунок 8. Функция Отношения сигнал-шум при $SNR_{m1}(v) = 1..10$ для апертуры исследуемой детали 100мм

На Рисунке 8 представлен график зависимости функции отношения сигнал\шум от пространственно-частотного диапазона и диапазона величины перемещения (0-10мм) для аппаратуры контроля качества крупногабаритных оптических поверхностей высокой точности в II-III диапазонах неоднородностей (Рисунок 7). Видно, что при малом перемещении отношение сигнал-шум меньше 10. Однако при большом перемещении ОСШ сильно снижается для большего пространственно-частотного диапазона неоднородностей. Оптимальный диапазон перемещения составляет 2-7мм.

Таблица 3.

Технические характеристики аппаратуры для контроля качества поверхностей во II-III диапазонах

Параметр	Значение
Длина волны, нм	633
Диаметр апертуры, мм	102
Разрешение камеры	1 MPix=1000x1000 Pix
Точность измерений (СКО), нм	$< 0.35 (\lambda/1\ 800)$
Стабильность измерений, нм	$< 0.06, \lambda/10\ 000$
Время экспозиции	302мс
Диапазон неоднородностей	2-3
Диапазон перемещения, мм	0,2-2

В работе было проведено экспериментальное измерение на стенде для II – III пространственно-частотного диапазона с целью проверки работы алгоритма абсолютной калибровки. Проведено четыре последовательных измерения: со сдвигом вправо, влево, вверх и вниз исследуемой детали относительно эталонной в соответствии с алгоритмом абсолютной калибровки (Рисунок 9).

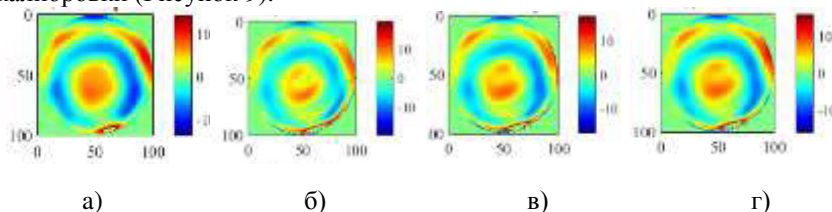


Рисунок 9. Результат проведения эксперимента со смещением исследуемой детали: а) вправо, б) влево, в) вверх, г) вниз на величину перемещения $T = 1\text{ мм}$

При помощи алгоритма абсолютной калибровки были восстановлены исследуемый и эталонный профиль поверхности (Рисунок 10, по центру). Для того, чтобы убедиться в правильности работы алгоритма, была получена суперпозиция рассчитанных топограмм (Рисунок 10, справа). Обработка этого изображения показала, что погрешность составила $\Delta = 1,3\%$. Для оценки погрешности метода была проведена серия экспериментов на интерферометре Zygo. Вначале было выполнено последовательно 20 экспериментов и обработаны при помощи алгоритма абсолютной калибровки. Затем был проведен расчет повторяемости. Результирующая повторяемость измерений вычисляется по следующей формуле:

$$R = \bar{R} + 2\sigma,$$

где $\bar{R}$ - среднее значение параметров R_i по всем измерениям:

$$R_i = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{pix}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{pix}}} (h_i(x_j, x_j) - \overline{h_i(x_j, x_j)})^2}, \quad i = 1..N,$$

$h_i(x_j, x_j)$ - результаты i -го измерения, $\overline{h_i(x_j, x_j)}$ - среднее распределение высот неоднородностей на исследуемой оптической поверхности по N измерениям, а σ - среднеквадратическое отклонение параметров R_i от среднего значения $\bar{R}$. Значение повторяемости эксперимента составило 0,97 нм.

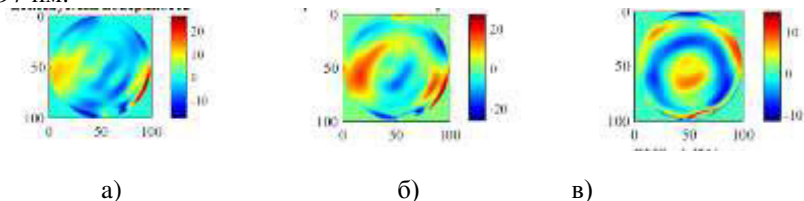


Рисунок 10. а) Восстановленная исследуемая поверхность; а) восстановленная эталонная поверхность; а) разница между восстановленными исследуемой и эталонной поверхностями

Метод абсолютной калибровки также был исследован в условиях вибраций на дополнительном стенде. Было показано, что в условиях вибраций, характерных для производства, метод абсолютной калибровки эффективен для апертур 8-100мм.

В заключение Главы 3 представлены результаты проведенного исследования на стенд для контроля качества оптических поверхностей в IV пространственно-частотном диапазоне (Рисунок 11).



Рисунок 11. Внешний вид стенда для измерения неоднородностей IV пространственно-частотного диапазона

Показано, что даже для микронеровностей такого масштаба, который относится к IV пространственно-частотного диапазону, данный метод динамической интерферометрии дает хороший результат, в частности позволяет оценить качество поверхности с погрешностью не более 0,1 нм.

Таблица 4.

**Технические характеристики аппаратуры для контроля качества
поверхностей в высокочастотном диапазоне**

Увеличение насадки	2.0X	5X
Поле зрения, ω_x (мм)	4,4	1,8
Оптическое разрешение при $\lambda=460\text{nm}$ (мкм)	3,8	1,5
Количество пикселей камеры	1,4 MPix=1200x1200 Pix	
Погрешность измерений, СКО (нм)	0,1	
Скорость сбора данных	>14 кадров в секунду	
Минимальное время измерения	<100 мкс	
Повторяемость СКО, нм	<0,005	
СКО погрешности прибора, нм	0,1	
Диапазон неоднородностей	4	

В заключении диссертационной работы формулируются основные результаты исследований.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Теоретически и экспериментально обоснована возможность использования метода динамической интерферометрии совместно с методом абсолютной калибровки для контроля качества поверхности крупногабаритных оптических деталей в производственных условиях в широком пространственно-частотном диапазоне неоднородностей.

2. На основе пространственно-частотного анализа предложена классификация неоднородностей оптической поверхности и для каждого выделенного класса установлен диапазон пространственных частот микронеровностей и обоснована интерферометрическая аппаратура для регистрации топограммы исследуемой поверхности.

3. Восстановлена топограмма исследуемой поверхности оптической детали с алгоритмической погрешностью не более 2нм за счет устранения влияния погрешностей эталонной поверхности при помощи модифицированной методики абсолютной калибровки интерферометра по методу двух плоскостей.

4. Предложена и разработана оригинальная оптическая схема телескопической насадки к интерферометру, обладающая волновой абберацией менее $0,01\lambda$ и позволяющая регистрировать топограммы поверхностей оптических деталей диаметром до 1м.

5. Предложена методика исследования точностных характеристик алгоритма абсолютной калибровки, позволяющая обосновать требования к разрабатываемой аппаратуре.

6. Разработана и изготовлена аппаратура для контроля качества поверхности крупногабаритных оптических деталей методами динамической интерферометрии для всех выделенных пространственно-частотных диапазонов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность использования метода динамической интерферометрии для контроля качества поверхности крупногабаритных оптических деталей в производственных условиях с погрешностью до 0,97нм. Подтверждены основные положения теоретических разделов диссертации.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Алгоритм восстановления профиля плоской оптической поверхности высокой точности / Я. В. Гладышева [и др.] // Измерительная техника. 2016. №. 2. С. 28-32. (0,84 п.л./0,5 п.л.)
2. Метод аттестационного контроля поверхностных неоднородностей оптических деталей на основе частотного анализа профиля поверхности / Я. В. Гладышева [и др.] // Измерительная техника. 2017. №. 2. С. 15-19. (0,84 п.л./0,5 п.л.)
3. The absolute calibration of high-precision optical flats across a wide range of spatial frequencies / Y. V. Gladysheva [et al.] //Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2015, T, 584, №, 1, C, 012020. (0,6 п.л./0,5 п.л.)
4. Методы контроля формы и качества поверхностей крупногабаритных высокоточных оптических элементов / Я. В. Гладышева [и др.] // Москва, Радиотехника, 2014, №4, С, 48-51. (0,48 п.л./0,4 п.л.)
5. Calibration of high precision surfaces of gravitational wave telescope optics / Y. V. Gladysheva [et al.] // Proceedings of International Conference PIRT-2015, 2015. №1. С. 165-170. (0,72 п.л./0,6 п.л.)