

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Гавлина Александра Евгеньевна

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ВЫПУКЛЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА,
ОСНОВАННЫЙ НА СХЕМЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ

Специальность: 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021 г.

Работа выполнена в Федеральном государственное бюджетном учреждении науки Научно-технологический центр Уникального приборостроения Российской академии наук (ФГБУН НТЦ УП РАН)

Научный руководитель: **Батшев Владислав Игоревич,**
к.т.н., ФГБУН НТЦ УП РАН, с.н.с.

Официальные оппоненты: **Коняхин Игорь Алексеевич,**
д.т.н, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», профессор

Поройков Антон Юрьевич,
к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Ведущая организация: ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева»

Защита состоится «__» _____ 20__ года в __-__ на заседании диссертационного совета 24.1.185.01 (Д 002.135.01) на базе Научно-технологического центра Уникального приборостроения РАН по адресу 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, в конференц. зале.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН и на сайте <http://ntcup.ru/zashhita-dissertacij/>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.185.01 (Д 002.135.01),

к.ф.-м.н.

Д.Ю. Великовский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Асферические поверхности используют во многих приборах для уменьшения их габаритов и компенсации аберраций изображения. Однако их изготовление и контроль, в частности контроль выпуклых поверхностей асферических деталей, являются сложными научными и техническими задачами.

Применение традиционных методов контроля поверхностей выпуклых асферических деталей сопряжено с изготовлением вспомогательных прецизионных оптических компонентов размерами большими, чем размеры контролируемых деталей.

Особенно актуальна эта проблема в последнее время, в связи со строительством экстремально больших телескопов, диаметры главных зеркал которых превышают 10 метров [1-3], а диаметры вторичных выпуклых зеркал – более 2 м, как показано в табл.1. К таким системам относятся, например, телескопы *E-ELT* [1], *TMT* [2] и другие.

Таблица 1.

Параметры выпуклых вторичных зеркал крупных телескопов

| Телескоп | Диаметр апертуры, м | Форма вторичного зеркала | Диаметр вторичного зеркала, м |
|------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|
| <i>VISTA</i> [3] | 4.1 | Выпуклое гиперболическое | 1.24 |
| <i>TMT</i> [2] | 30.0 | Выпуклое гиперболическое | 3.04 |
| <i>ELT</i> [1] | 42.0 | Выпуклое гиперболическое | 4.25 |

Большинство используемых в этих телескопах вторичных зеркал являются выпуклыми асферическими, причем они обладают различными формами (эллиптические, гиперболические, поверхности высших порядков и др.) и различными геометрическими параметрами. Каждое крупногабаритное зеркало является уникальным. И для контроля каждого конкретного зеркала приходится изготавливать вспомогательное прецизионное оптическое устройство (компенсатор), которое не может быть применено для контроля другого зеркала. Все это существенно удорожает и усложняет изготовление выпуклых астрономических зеркал.

В этой связи разработка новых универсальных методов контроля выпуклых асферических зеркал, не требующих применения крупногабаритных вспомогательных оптических элементов, является актуальной научно-технической задачей.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы заключается в разработке и исследовании нового метода контроля формы выпуклых сферических и асферических оптических поверхностей, не требующего применения вспомогательных оптических деталей диаметром большим диаметра контролируемой поверхности.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих методов контроля выпуклых асферических оптических поверхностей вращения;

2. Предложен, разработан и апробирован интерференционный метод контроля выпуклых сферических и асферических оптических поверхностей вращения, использующий схему ортогональных лучей, в которой контролируемая поверхность освещается перпендикулярным её оси симметрии коллированным пучком монохроматического излучения;

3. Разработан алгоритм математической обработки полученной предложенным методом интерферограммы, позволяющий определить форму контролируемой поверхности, без априорной информации о её геометрических параметрах.

Положения, выносимые на защиту

1. В интерферометре, построенном по схеме ортогональных лучей, размер участка интерференционной картины, содержащего необходимую информацию о форме контролируемой поверхности, определяются не диаметром этой поверхности, а ее угловой апертурой, что позволяет контролировать поверхности с угловой апертурой до 22.5° без использования вспомогательных оптических деталей с размером, большим диаметра контролируемой поверхности.

2. Метод математической обработки интерферограммы, основанный на поиске огибающей семейства виртуальных парабол, параметры которых вычисляются из координат интерференционных полос, позволяет вычислять координаты точек на меридиональных профилях контролируемых оптических поверхностей вращения без априорной информации о геометрических параметрах поверхностей с погрешностью не более 10 нм для зон поверхностей с диаметром D , большим $1/40$ радиуса R кривизны при вершине ($D/R > 1:40$), при условии, что координаты интерференционных полос определены без погрешностей.

3. Разработанная методика юстировки для интерферометра, построенного по схеме ортогональных лучей, обеспечивает возможность контроля формы выпуклых зеркал с погрешностью не более 60 нм.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены диссертантом лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

Научная новизна результатов и выводов

1. Разработан универсальный интерференционный метод, позволяющий контролировать выпуклые сферические и асферические поверхности; причем для всех сочетаний геометрических параметров контролируемых поверхностей используется одна и та же оптическая система интерферометра, не содержащая сменных оптических элементов.

2. Предложен математический алгоритм обработки данных, полученных разработанным интерференционным методом, основанный на нахождении огибающей семейства виртуальных парабол и позволяющий определить координаты точек, принадлежащих исследуемой контролируемой поверхности.

Практическая значимость работы

1. Стоимость контроля выпуклых поверхностей крупногабаритных оптических деталей разработанным интерференционным методом существенно (в несколько раз) ниже по сравнению с применяемыми в настоящее время методами при сохранении точности за счет того, что:

- разработанный метод не требует применения дополнительных высококачественных оптических деталей диаметром большим диаметра КП;
- разработанный метод является универсальным и может применяться для контроля формы выпуклых АП различных форм без изменения оптической системы интерферометра.

2. Разработанный метод математической обработки данных интерферограммы, полученной интерференционным методом с применением схемы ортогональных лучей, позволяет не только контролировать качество выпуклой оптической поверхности, но и вычислять ее геометрические параметры.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена математическим моделированием, которое выполнялось на различных стадиях исследования, а также хорошим соответствием расчетных и экспериментально полученных результатов.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на:

- 1) 10-ая, 11-ая, 12-ая Международных конференциях «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» ARMIMP (Суздаль, 2017; Суздаль, 2018; Москва, 2019).
- 2) XXIV, XXV Международных Симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2018; Новосибирск, 2019).
- 3) XV, XVI Международных научно-технических конференциях «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2019; Москва, 2021).
- 4) 2-ая Международной молодежной конференции «Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения» (Астрахань, 2018).
- 5) Международной конференции SPIE Optical Metrology (Мюнхен, 2019).
- 6) Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов на предприятии ОРИОН (Москва, 2020).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 1 патент РФ, 7 статей в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, 7 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, 4 Глав и Заключения, изложена на 108 страницах и содержит 56 рисунков, 18 таблиц, 4 Приложений и 89 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, а также структура диссертации.

Глава 1 посвящена анализу традиционных методов контроля формы выпуклых асферических зеркал, применяемых на производстве, а также анализу разрабатываемых методов контроля.

Описаны недостатки всех существующих методов контроля, используемых на производстве:

- эти методы не являются универсальными, поскольку для контроля выпуклых АП различной формы необходимо вносить изменения в измерительную оптическую систему;
- для контроля выпуклых крупногабаритных АП традиционными методами необходимо изготавливать вспомогательные крупногабаритные прецизионные оптические детали, диаметром большим, чем КП. При этом, изготовленные вспомогательные оптические детали подходят для контроля выпуклых АП только конкретной формы и, как правило, используются один раз.

Описаны современные разрабатываемые методы контроля выпуклых АП, такие как дефлектометрия, а также методы контроля на основе ортогональных лучей [4]. Последняя представляет собой схему освещения КП параллельным пучком лучей, направленным перпендикулярно оси симметрии КП (Рис. 1). Анализируя структуру отраженного от КП луча тем или иным методом, можно определить форму профиля КП. Вращение КП вокруг оси симметрии позволяет выполнить контроль множества профилей и восстановить топографическую карту отклонений КП.

Описанные в первой главе разрабатываемые методы являются универсальными для контроля различных форм АП. Однако, точность дефлектометрии на практике составляет единицы микрометров, в то время как требования к точности зеркал телескопов составляет несколько нанометров. Описанные неинтерференционные методы контроля на базе схемы ортогональных лучей также уступают по точности традиционным методам контроля.

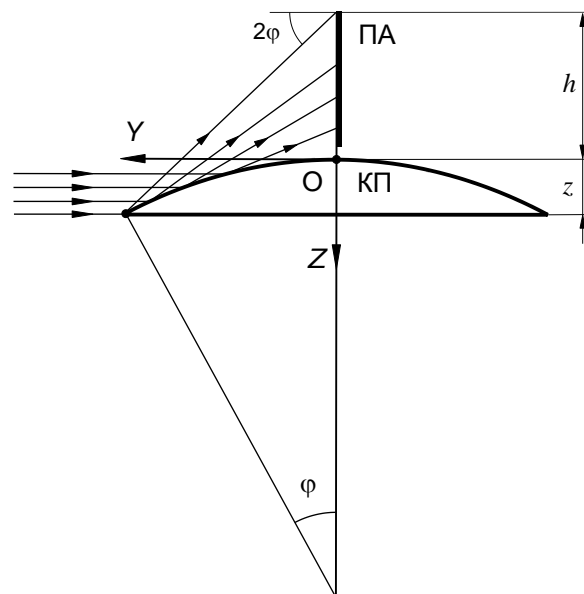


Рис. 1. Схема ортогональных лучей [4].

Разрабатываемый интерференционный метод контроля на базе схемы ортогональных лучей (Рис. 1), предложенный профессором Д.Т. Пуряевым [4], теоретически не уступает по точности традиционным интерференционным методам и является универсальным для контроля АП различной формы.

Согласно предложенному методу КП освещается параллельным монохроматическим пучком лучей, который направлен перпендикулярно оси симметрии контролируемой детали, как показано на Рис. 2. Часть пучка – опорный пучок 1 – проходит над КП, а другая часть – предметный пучок 2 – отражается от нее.

Предметный и опорный пучки интерферируют в плоскости анализа (ПА). Поскольку форма полосы первого максимума интерференционной картины является кривой, эквидистантной сагиттальному профилю КП, то ее анализ позволяет судить о форме профиля КП в сагиттальном сечении. Таким образом, метод позволяет контролировать выпуклые асферические и сферические поверхности различной формы. Однако при контроле выпуклых поверхностей большого диаметра регистрировать интерференционный максимум крайне трудно из-за его большой длины и значительной стрелки прогиба. Поэтому описанный метод контроля применим только для деталей маленького диаметра.

Из сказанного выше следует, что описанные в главе разрабатываемые методы не пригодны для контроля крупногабаритных астрономических зеркал.

Отмечено, что схема ортогональных лучей является перспективной для разработки нового интерференционного метода контроля, универсального для контроля формы выпуклых крупногабаритных АП различной формы, работающего без использования оптических деталей диаметра большего, чем диаметр КП.

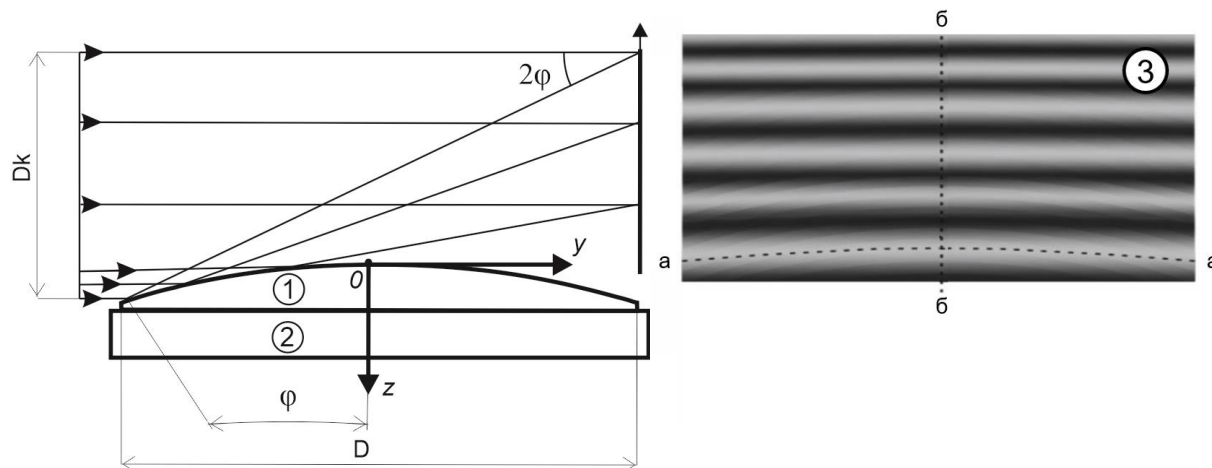


Рис. 2. Схема интерференционного метода контроля на базе схемы ортогональных лучей

В Главе 2 описан разработанный интерференционный метод контроля выпуклых АП на базе схемы ортогональных лучей.

В отличие от метода, предложенного профессором Пуряевым, анализируется не первый максимум интерферограммы *a-a*, лежащий в сагиттальном сечении, а распределение интенсивности в меридиональном сечении интерферограммы *б-б* (Рис. 2).

Информация о меридиональном профиле КП содержится в координатах интерференционных полос в меридиональном сечении. При этом размер вспомогательных оптических элементов, необходимых для формирования плоского волнового фронта, зависит не от диаметра КП, а от ее крутизны (угла φ наклона крайней нормали). Из элементарных геометрических соображений (Рис. 2) следует, что когда крутизна зеркала не превышает 22.5° ($2\varphi=45^\circ$), а ПА расположена на расстоянии $L = D/2$ от оси КП, диаметр пучка лучей D_k , требующийся для освещения КП, меньше диаметра D этой поверхности. У большинства крупногабаритных зеркал в разрабатываемых телескопах этот угол существенно меньше 22.5° .

В табл. 2 приведены углы φ выпуклых поверхностей асферических зеркал в разрабатываемых телескопах и рассчитанные требуемые диаметры D_k вспомогательных оптических элементов, необходимые для освещения КП.

Параметры крутизны выпуклых астрономических зеркал

| Телескоп | Диаметр выпуклого зеркала D , м | Угол наклона крайней нормали $\varphi_{кр}$, ° | Диаметр коллимированного пучка лучей D_k , м |
|--------------|-----------------------------------|---|--|
| <i>E-ELT</i> | 4.25 | 11 | 1.8 |
| <i>LSST</i> | 3.42 | 15 | 2.0 |
| <i>TMT</i> | 3.05 | 14 | 1.6 |
| <i>VISTA</i> | 1.24 | 8 | 0.4 |
| <i>MMT</i> | 1.20 | 9 | 0.4 |
| <i>VLT</i> | 1.12 | 7 | 0.4 |

Приведен разработанный метод математической обработки данных с использованием огибающей семейства парабол (далее по тексту - метод огибающей парабол), позволяющий по зарегистрированной в схеме ортогональных лучей интерферограмме определять координаты точек КП и ее геометрические параметры.

Результатом измерения являются координаты интерференционных полос. Каждая полоса соответствует изменению разности хода между интерферирующими пучками на одну длину волны, поэтому в результате измерения координат интерференционных полос можно определить распределение разности хода вдоль ПА, т.е. функцию $\Delta(h)$.

Из Рис. 3 видно, что разность хода Δ_B в произвольной точке B в ПА равна:

$$\Delta_B = PB - AB. \quad (1)$$

Координаты точки P неизвестны, и задача восстановления профиля КП заключается в определении координат всех его точек. Однако, про точку P известно, что она принадлежит кривой, для которой справедливо соотношение:

$$PB - AB = \text{const} = \Delta_B. \quad (2)$$

Геометрическое место точек P , удовлетворяющих (2), представляет собой параболу Рис. 3, геометрический фокус которой совпадает с точкой B , директриса удалена от фокуса на расстояние Δ_B .

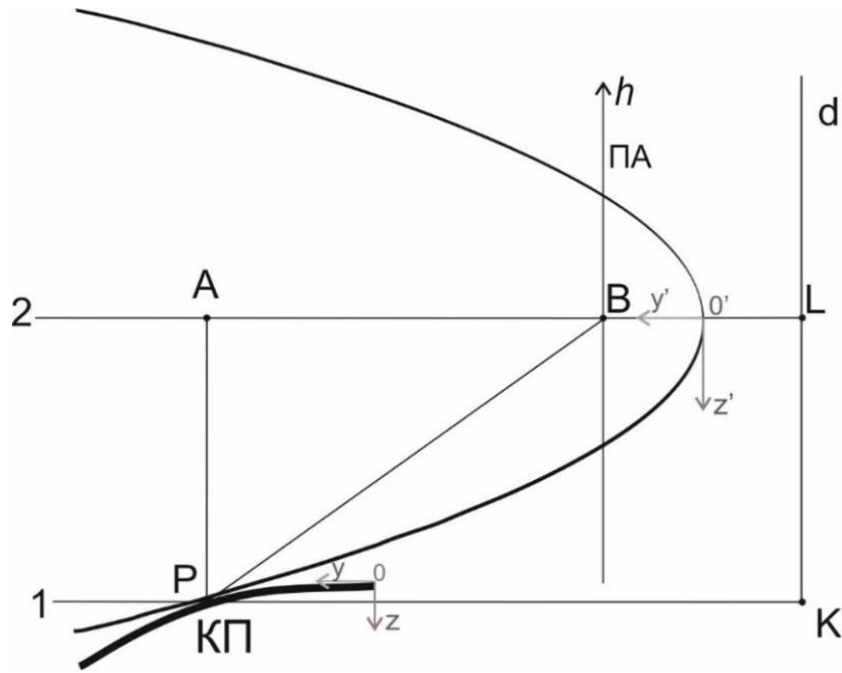


Рис. 3. К определению уравнения параболы.

Аналогичные рассуждения справедливы для любой другой точки КП. Поэтому профиль КП – огибающая семейства парабол, как показано на Рис. 4. Таким образом, зная распределение разности хода интерферограммы вдоль плоскости регистрации, можно определить координаты КП.

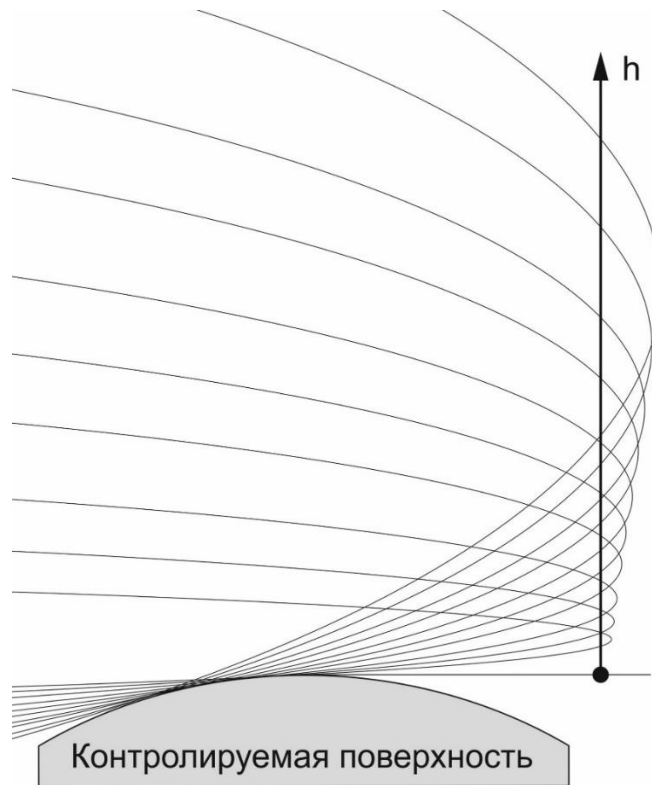


Рис. 4. Профиль КП, как огибающая семейства парабол.

Измерительной информацией при реализации разработанного метода являются координаты интерференционных максимумов или минимумов. Определение координат промежуточных (не минимальных и не максимальных) значений интенсивности не представляется возможным из-за высокой погрешности таких измерений. По этой причине в результате измерений получается дискретный набор данных. Это обуславливает погрешность вычисления координат точек КП. Кроме того, вблизи вершины КП ширина интерференционных полос выше, чем на краю, т.е. шаг дискретизации и как следствие погрешность вычислений координат КП у ее вершины выше, чем на краю. Во второй главе представлено исследование точности предложенного метода огибающей парабол путем численного моделирования. Показано, что при контроле на длине волны 633 нм погрешность вычисления координат менее 10 нм для зон контролируемых поверхностей с диаметром D , большим $1/20$ радиуса R кривизны при вершине ($D/R > 1:20$).

В **Главе 3** приведены результаты экспериментальной апробации метода огибающей парабол. Эксперимент выполнен на установке, которая содержит *He-Ne* лазер с длиной волны 633 нм, систему пространственной фильтрации лазерного пучка (микрообъектив + пинхол), коллиматор с фокусным расстоянием 1600 мм, образующий плоский волновой фронт диаметром $D_k=150$ мм. Исследовалась выпуклая сферическая поверхность линзы с диаметром $D=30$ мм, радиусом кривизны $R=725$ мм, конической константой $k=0$. О исследуемой КП известны только ее геометрические параметры, реальные отклонения формы не известны. Поэтому цель эксперимента - определить по интерферограмме геометрические параметры КП и сравнить их с известными.

В качестве приемника излучения использовалась КМОП камера *The Imaging Source DFK72BUC02* с размером фоточувствительной области $5.7 \times 4.3 \text{ мм}^2$ и размером пикселя 2.2 мкм. Схема эксперимента, фотография экспериментальной установки представлены на Рис. 5.

Плоский волновой фронт частично отражается от КП линзы 1, а частично проходит над ней. Прямые и отраженные лучи интерферируют в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения падающих на КП лучей. Интерференционная картина (Рис. 5б) представляет собой интерференционные полосы разной толщины. Видеокамера регистрирует интерференционную картину, формируемую на приемнике излучения 2.

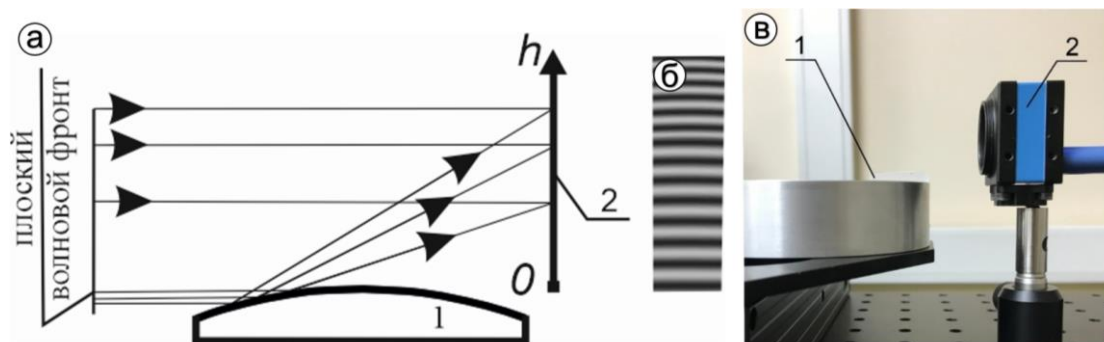


Рис. 5. Схема эксперимента (а), фрагмент интерферограммы (б), фотография (в) экспериментальной установки: 1 – КП, 2 – приемник излучения.

В результате эксперимента зарегистрирована и обработана интерференционная картина, представленная на Рис. 6.

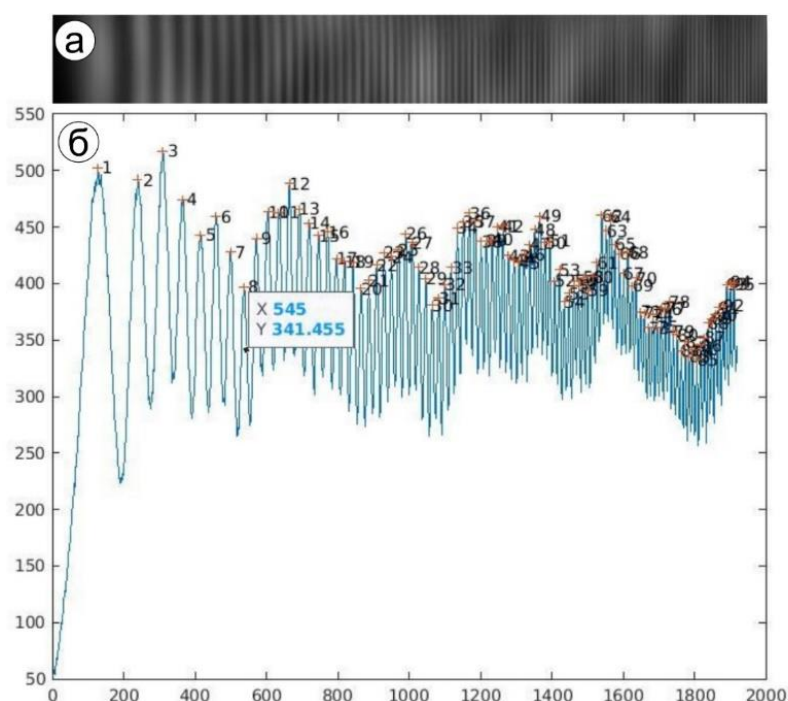


Рис. 6. Зарегистрированная интерферограмма (а), максимумы интерферограммы (б).

По зарегистрированной и обработанной интерферограмме найдено распределение разности хода Δ в зависимости от высоты h в плоскости регистрации. Экспериментально полученные вектора Δ и h являются параметрами семейства парабол, по которым вычислена их огибающая (рис. 7).

На рис. 7. символом «о» представлены вычисленные координаты огибающей семейства парабол. Сплошной линией представлена кривая, полученная аппроксимацией точек огибающей полиномом второго порядка с помощью метода наименьших квадратов.

Радиус кривизны вычисленной аппроксимирующей кривой $R=724,95$, а коническая константа $k=-0,00166$. Вычисленные геометрические параметры кривой хорошо совпадают с параметрами, представленными в ее паспорте. При таких геометрических параметрах вычисленная форма КП отличается от реальной сферической (если считать, что у нее нет местных погрешностей) на 10 нм.

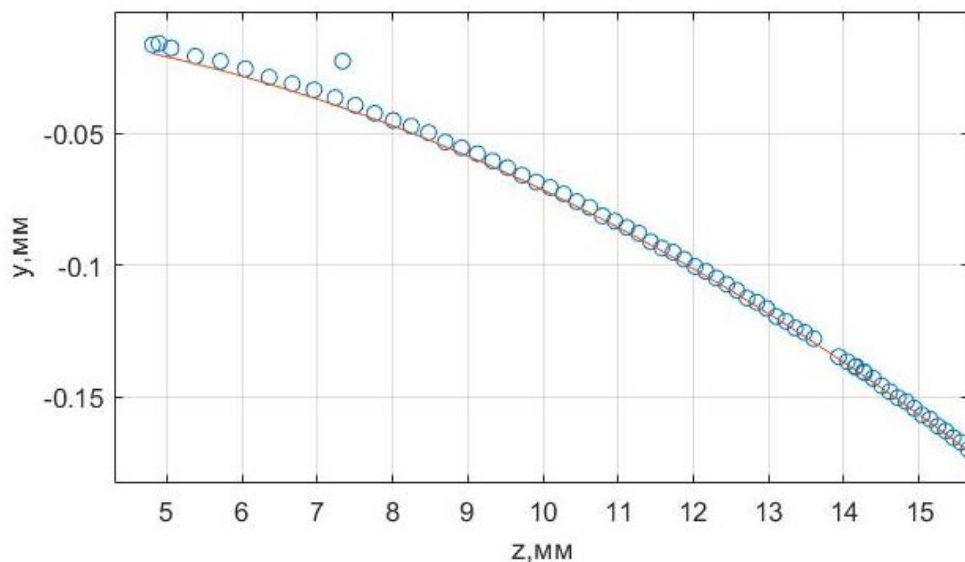


Рис. 7. Найденный профиль исследуемой выпуклой поверхности.

Описанный эксперимент представлен для оптической детали с такими параметрами, при которых интерференционная картина полностью умещается на ПЗС матрицу видеокамеры. Однако, практический интерес представляет метод контроля выпуклых оптических крупногабаритных деталей, длина анализируемой интерференционной картины которых существенно больше, чем длина любой стандартной ПЗС матрицы.

Для регистрации интерферограммы крупногабаритных деталей был разработан и сконструирован интерферометр, построенный по схеме ортогональных лучей, регистрирующий интерферограмму сканированием ее отдельных фрагментов. В настоящий момент этот интерферометр введен в состав государственного специального эталона единицы длины отклонений от плоскостности оптических поверхностей размером до 200 мм ГЭТ 183-2019 для контроля формы выпуклых сферических и АП в институте метрологической службы ВНИИМС.

В Главе 4 описана методика юстировки, проводимая перед началом контроля формы КП на разработанном интерферометре, позволяющая минимизировать влияние погрешностей взаимного расположения его элементов.

Основной вклад в погрешность контроля, вызванную неточностью юстировки, вносят: неплоскостность волнового фронта, непараллельность волнового фронта оптической оси системы регистрации, несовпадение оси симметрии контролируемой детали с осью ее вращения.

Неплоскостность волнового фронта устраняется стандартной юстировкой интерферометра Физо, создающего параллельный пучок лучей в разработанном макете интерферометра.

Разработана методика юстировки, минимизирующая вклад непараллельности оси системы регистрации волновому фронту, а также несовпадение оси симметрии контролируемой детали с осью ее вращения. Приведена оценка влияния погрешности установки КП в интерферометр на точность контроля.

Результатом измерений на интерферометре является топографическая карта отклонений формы КП от идеальной. Она получается из измерений множества профилей КП и их сшивки. При этом погрешность измерений возникает главным образом из-за несовпадения оси симметрии зеркала и оси вращения стола. Как показано в диссертации, при допустимых значениях децентрировки КП $\alpha = 2'$ (Рис. 8), вклад их в погрешность контроля не более 23 нм для поверхностей с параметрами, приведенными в таблице 3.

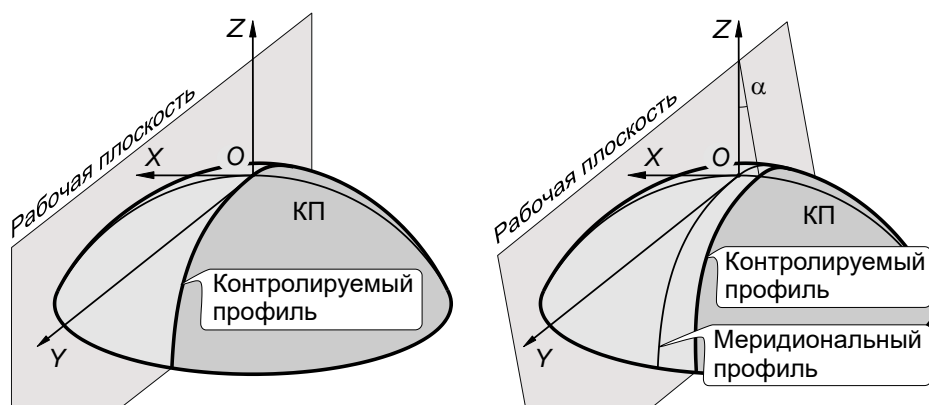


Рис. 8. Найденный профиль исследуемой выпуклой поверхности.

Результаты расчёта подтверждены экспериментальным исследованием. Исследовалась эталонное выпуклое сферическое зеркало диаметром 400 мм и радиусом кривизны 400.055 мм с известным отклонением формы в пределах $PV \sim 60$ нм и $RMS \sim 15$ нм. В результате контроля этого зеркала на разработанном интерферометре получена топографическая карта отклонения формы, представленная на Рис. 9.

Вклад неточности юстировки в погрешность контроля

| Коническая константа k , ед. | Форма КП | Диаметр КП D , мм | Минимальный радиус кривизны при вершине R_{min} , мм | Погрешность контроля δ , нм |
|--------------------------------|-------------|---------------------|--|------------------------------------|
| 0...1 | Эллипсоид | 250 | 430...450 | 23.0 |
| 0 | Сфера | 280 | 430 | 21.8 |
| -1...0 | Эллипсоид | 250 | 410...430 | 20.5 |
| -1 | Параболоид | 250 | 410 | 20.4 |
| -1...-2 | Гиперболоид | 250 | 390...410 | 18.3 |
| -2...-4 | Гиперболоид | 250 | 350...390 | 17.8 |

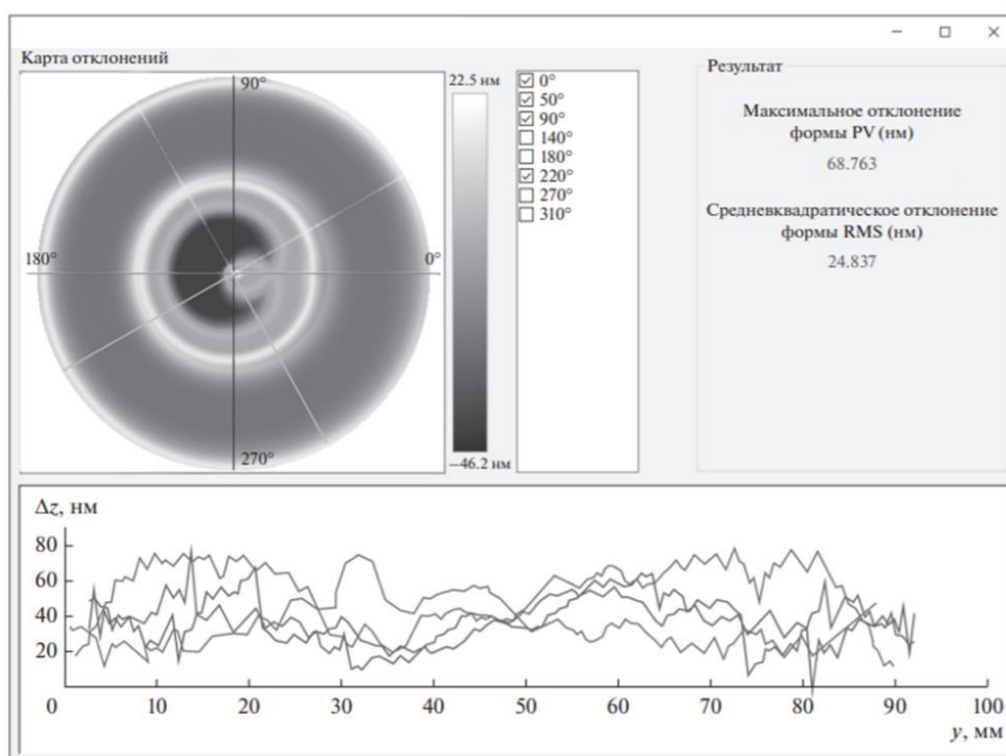


Рис. 9. Топография исследуемого эталонного зеркала, полученная с помощью разработанного интерферометра.

Полученные на интерферометре значения отклонения формы исследованной поверхности составили $PV=68$ нм, $RMS=24.8$ нм, что хорошо совпадает с паспортными данными детали. Это позволяет сделать вывод, что погрешность контроля в данном эксперименте не превышает заявленной в паспорте погрешности формы эталонного зеркала (60 нм).

Таким образом, экспериментально показано, что разработанная методика юстировки обеспечивает погрешность контроля не более 60 нм.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Список опубликованных работ:

Статьи, индексируемые в базах Web of Science и Scopus:

1. Batshev, V. I., Gavlina, A. E., Novikov, D. A. Testing method of large-sized convex optical surfaces // Proc. SPIE. – 2018. – V. 10833. – P. 108331R.
2. Gavlina, A. E., Novikov, D. A., Sergeeva, M. V. Compact interferometer for precise shape testing of large-size convex aspherical mirrors // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1421. – P. 1-4.
3. Gavlina, A. E., Batshev, V. I., Novikov, D. A., Sergeeva, M. V. Interferometer for large convex optical aspheric surfaces testing // Proc. SPIE. – 2019. – V. 11056. – P. 110563T.
4. Askerko, M. V., Gavlina, A. E., Batshev, V. I., Novikov, D. A. Orthogonal ray interferometer: modification for testing convex and concave mirror surfaces // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2127. – P. 012067.
5. Gavlina, A. E., Batshev, V. I., Novikov, D. A., Sergeeva, M. V. Topography mapping of convex aspheric surface up to 300 mm diameter Using "orthogonal ray" method // Proc. SPIE. – 2019. – V. 11208. – P. 112082K.
6. Gavlina, A. E., Novikov, D. A., Askerko, M. V. Orthogonal ray scheme: A method for processing interference patterns and reconstructing the shape of a test convex mirror // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2127. – P. 012066.
7. Батшев, В. И., Новиков, Д. А., Гавлина, А. Е., Баландин, И. А. Интерферометр для контроля формы выпуклых зеркал оптических и радиотелескопов, построенный по схеме ортогональных лучей // Радиотехника и электроника. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 44-50.

Патенты:

8. Пат. 2706388 Российская Федерация, МПК G 01 В 11/24. Метод контроля формы выпуклых оптических сферических и асферических поверхностей и устройство для его осуществления / Д. А. Новиков, Н. В. Иванникова, В. И. Батшев, А. С. Мачихин, А. Е. Гавлина; заявитель и патентообладатель РОССТАНДАРТ. – № 2019103813/09 ; заявл. 12.02.19 ; опубл. 18.11.19, Бюл. № 32.

Другие публикации:

9. Гавлина, А. Е., Батшев, В. И., Новиков, Д. А. Современные методы контроля выпуклых асферических зеркал // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 10-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. – Суздаль, 2017. – С. 198-200.
10. Новиков, Д. А., Иванникова, Н. В., Батшев, В. И., Гавлина, А. Е. Интерферометр для контроля качества выпуклых асферических зеркал размером до 250 мм // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 10-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. – Суздаль, 2017. – С. 200-202.
11. Гавлина, А. Е., Новиков, Д. А. Метод и устройство для контроля выпуклых оптических поверхностей диаметром 50-250 мм // Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения : сборник трудов II международной молодежной конференции. – Астрахань, 2019. – С. 8.
12. Гавлина, А. Е., Батшев, В. И., Новиков, Д. А. Интерференционный метод контроля выпуклых оптических поверхностей большого // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 11-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. – Суздаль, 2018. – С. 119-121.
13. Гавлина, А. Е., Батшев, В. И., Новиков, Д. А. Интерференционная установка для контроля формы выпуклых асферических зеркал диаметром до 250 мм // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 12-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. – Москва, 2019. – С. 141-143.
14. Гавлина, А. Е., Батшев, В. И. Интерферометр для контроля формы выпуклых асферических зеркал // Тезисы докладов IX научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Москва, 2020. – С. 10-11.

Цитируемая литература:

1. Gilmozzi, R., Spyromilio, J. The European Extremely Large Telescopes // Messenger. – 2007. – №. 127. – P. 11-19.
2. Johns, M. The Giant Magellan Telescope // Proc. SPIE. – 2008. – V. 6986. – P. 698603.
3. Абдулкадыров, М. А., Патрикеев, А. П., Белоусов, С. П., Игнатов, А. Н., Патрикеев, В. Е., Придня, В. В., Полянщиков, А. В., Семенов, А. П., Шаров, Ю. А., Полещук, А. Г.,

Насыров, Р. А., Маточкин, А. Е., Eli Atad- Etedgui, Egan Ian, Bennet Richard J., Craig Simon. Изготовление главного M1 и вторичного M2 зеркал для проекта телескопа VISTA // Прикладная оптика 2006: Сб. трудов межд. конф. – СПб., 2006. – Т. 2. – С. 165- 170.

4. Пат. 1044969 СССР, МКИ 4G 01 В 11/24. Способ измерения профиля оптических поверхностей / Д.Т. Пуряев; Высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана. – № 3467407.25-28; заявл. 09.07.82; опубл. 30.09.83, Бюл. № 36. 3 с.

