

На правах рукописи

Дружин Владислав Владимирович

**МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ВЫПУКЛЫХ
АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2008

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре «Опτικο-электронные приборы научных исследований».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пуряев Даниил Трофимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Колочкин Василий Яковлевич
МГТУ им. Н.Э. Баумана

кандидат технических наук
Подобрянский Анатолий Викторович
ФГУП «НПО Оптика»

Ведущая организация: **ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»**, г. Москва

Защита диссертации состоится « 24 » декабря 2008 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Бурый Е.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Оптическая астрономия в начале XXI века испытывает бурное развитие. В настоящее время во многих странах мира идет интенсивное создание и строительство новых телескопов наземного и космического базирования, которые предназначены для принципиально новых астрофизических исследований космоса. За последние несколько лет в мире введено в эксплуатацию более десятка крупных телескопов, среди которых многие имеют диаметры главных зеркал 8...10 м. Создание таких телескопов стало возможным благодаря общему технологическому развитию. При этом одним из решающих факторов является технология изготовления и контроля высокоточных оптических деталей большого диаметра.

Большинство разработанных методов контроля асферических поверхностей (АП) относится к контролю вогнутых поверхностей, для которых наиболее успешно применяются компенсационный и голографический методы. Наряду с успехами в области контроля АП существуют и большие проблемы, одна из которых - контроль формы выпуклых асферических зеркал крупных телескопов. Это связано с тем, что контроль качества выпуклых АП требует применения высокоточных вспомогательных элементов, диаметры которых в несколько раз (а иногда даже в несколько десятков раз) превышают диаметр самой контролируемой поверхности. Использование вспомогательных элементов больших диаметров значительно усложняет контроль и увеличивает стоимость изготовления зеркал.

Одной из возможных схем контроля выпуклых гиперболических зеркал является схема Хиндла, которая предусматривает применение вспомогательного сферического зеркала значительно большего диаметра, чем контролируемое зеркало. Например, для контроля выпуклого гиперболического зеркала телескопа *Thirty Meter Telescope (TMT)* диаметром 3046 мм потребуется сфера Хиндла диаметром примерно 7850 мм. Очевидно, что изготовление вспомогательных элементов таких размеров нецелесообразно со всех точек зрения, включая и экономическую.

Разработка новых методов контроля формы АП зеркал телескопов приобретает особую актуальность сегодня, когда астрономы все более остро ощущают необходимость создания крупных наземных телескопов нового поколения с главными зеркалами диаметром от 10 до 100 м и вторичными выпуклыми асферическими зеркалами с диаметром более одного метра. Предполагается, что телескопы нового поколения будут иметь главное зеркало сферической формы, так как изготовление большого количества одинаковых сферических сегментов несравнимо проще, чем изготовление нескольких различных видов внеосевых сегментов параболоида или гиперболоида вращения. Вторичные зеркала таких телескопов должны иметь форму

выпуклого эллипсоида или выпуклой АП высших порядков. Однако, контроль качества выпуклых АП указанной формы в настоящее время наиболее труден.

Нерешенной проблемой, как для вогнутых, так и для выпуклых асферических зеркал, является измерение их геометрических параметров, а именно: радиуса кривизны при вершине поверхности и конической константы.

Перечисленные проблемы контроля формы выпуклых АП свидетельствуют об отсутствии достаточно простого и надежного метода контроля формы выпуклых асферических зеркал, что является препятствием для создания высококачественных оптических телескопов. Поэтому такое состояние проблемы контроля послужило причиной поиска новых методов контроля формы выпуклых АП.

Цель работы и задачи исследований

Целью диссертационной работы является поиск, разработка и исследование возможности применения принципиально новых методов контроля формы выпуклых АП, пригодных для использования в производственных условиях и выгодных, как с экономической, так и с технической точек зрения.

Объектом исследования в диссертации являются асферические зеркала современных оптических телескопов.

Предмет исследования – модернизация методов измерения, контроля профиля и формы выпуклых асферических зеркал.

Для достижения указанной цели решены следующие **задачи**:

1. проведен анализ известных методов контроля формы выпуклых АП с точки зрения возможности их применения для исследования выпуклых астрономических зеркал;

2. найдены, разработаны и исследованы возможности применения принципиально новых методов контроля формы выпуклых АП, не требующих использования крупногабаритных вспомогательных оптических деталей, поддающихся автоматизации в производственных условиях;

3. разработаны методы производственного и аттестационного контроля формы выпуклых АП, а также оптических систем приборов для реализации разработанных методов;

4. разработаны методы измерения геометрических параметров АП второго порядка.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы математического и физического моделирования на основе впервые выявленных геометрических свойств АП, базирующихся на фундаментальных законах и явлениях геометрической и физической оптики.

Научная новизна исследований

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1. предложены и разработаны методы контроля профиля выпуклых АП, базирующиеся на видоизмененном методе Гартмана, методе пограничной кривой и интерференционном методе;
2. разработан метод измерения геометрических параметров выпуклых АП вращения второго порядка на основе метода Шателен-Ландвера;
3. впервые выявлена и показана возможность измерения вершинного радиуса АП, несмотря на наличие отверстия или нерабочей зоны в центральной части асферического зеркала.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. методы измерения и контроля профиля выпуклых асферических зеркал, основанные на освещении контролируемой поверхности световым пучком, лучи которого направлены перпендикулярно оси симметрии контролируемой детали, позволяют:

- исследовать выпуклые поверхности в производственных условиях, причем возможно измерение профиля не только полированных, но и шлифованных поверхностей,
- снизить затраты благодаря использованию стандартных оптических, механических и оптико-электронных узлов,
- сократить длительность технологических циклов в процессе формообразования АП;

2. на базе разработанных методов предложена оптическая система и конструкция интерферометра, позволяющего производить измерения и контроль шлифованных и полированных поверхностей непосредственно в зоне их обработки.

Реализация и внедрение результатов

Результаты работы использованы в учебном процессе кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе «Оптические измерительные и контрольно-юстировочные приборы» в виде лекций и семинарских занятий. Модернизированный метод Гартмана проверен экспериментально и реализован для контроля формы выпуклых сферических поверхностей в лабораторных условиях.

Апробация работы

Полученные в диссертации научные результаты обсуждались на заседании и научных семинарах кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» (РЛЗ) МГТУ им. Н.Э. Баумана, были доложены на четырех международных конференциях: «Прикладная Оптика 2006» (г. Санкт-Петербург), «Прикладная Оптика 2007» (г. Санкт-Петербург), Четырнадцатой

международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва), «Прикладная Оптика 2008» (г. Санкт-Петербург).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 работ, одна из них опубликована в журнале, входящем в Перечень ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит список библиографических описаний цитируемых источников из 64 наименований. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста и содержит 56 рисунков и 7 таблиц.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Видоизмененный метод Гартмана, метод пограничной кривой и интерференционный метод позволяют контролировать профиль шлифованных и полированных выпуклых АП крупных телескопов в производственных условиях с необходимой точностью.

2. Модифицированный метод Шателен-Ландвера, основанный на измерении параметров интерференционной картины на локальных участках асферического зеркала позволяет определить вершинный радиус асферической поверхности, несмотря на наличие отверстия в центральной зоне зеркала.

3. Разработаны методы контроля формы выпуклых АП, перспективные для автоматизации измерений в производственных условиях.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и основные задачи, приведены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния проблемы измерения геометрических параметров и контроля формы выпуклых асферических зеркал оптических телескопов. Рассматриваются и анализируются известные методы и приборы для контроля формы выпуклых АП с точки зрения возможности их применения для контроля формы выпуклых асферических зеркал гигантских размеров (по сравнению с предшествующими размерами зеркал).

Рассмотрены основные оптические схемы гигантских оптических телескопов. Отмечено, что в последнее время в зеркальных телескопах широкое применение получила оптическая схема Ричи-Кретьена, в которой главное зеркало — вогнутое гиперболическое, мало отличающееся от параболической формы, а вторичное — выпуклое гиперболическое.

Приведены параметры выпуклых асферических зеркал современных крупных телескопов, введенных в эксплуатацию или планируемых к изготовлению. Отмечено, что в оптических системах телескопов предшествующих поколений практически не использовались выпуклые зеркала диаметром более одного метра, поэтому выпуклые зеркала диаметром более трех метров поражают воображение не только своими размерами, но и проблемами высокоточного контроля их формы. Достаточно обратить внимание на выпуклое эллиптическое и выпуклое гиперболическое зеркала телескопов *LSST* и *TMT* с диаметрами более трех метров, в которых допустимое среднеквадратическое отклонение не превышает $\lambda/30$, что для видимой области спектра составляет примерно 20 нм.

Проведенный сравнительный анализ современных методов контроля показывает, что, как правило, они требуют применения крупногабаритных вспомогательных оптических элементов, сложны при использовании в производственных условиях, экономически неэффективны и практически не применимы для шлифованных поверхностей. Ни один из существующих методов не может быть применен для контроля формы выпуклых трехметровых зеркал, если не выходить за рамки разумно допустимых размеров вспомогательных зеркал.

Нерешенной проблемой, как для вогнутых, так и для выпуклых зеркал, является проблема измерения их геометрических параметров, а именно: радиуса кривизны при вершине АП (вершинный радиус) и конической константы АП вращения второго порядка. Впервые идея измерений геометрических параметров была предложена французским ученым И. Шателен и в последствии была развита немецким ученым Р. Ландвером. Цель этих исследований заключалась главным образом не в определении геометрических параметров АП, а в контроле их локальных участков небольших размеров, порядка нескольких миллиметров, причем диаметр всей поверхности не превышал 50-60 мм. Погрешности формы выявлялись на краевых зонах АП. Исследования были выполнены только для параболической поверхности. Техническая реализация этих методов опиралась на использование вспомогательных оптических и механических устройств низкой точности.

Сделан вывод о необходимости разработки принципиально новых методов контроля формы и измерения геометрических параметров выпуклых зеркал современных оптических телескопов.

Вторая глава диссертации посвящена разработанным методам измерения и контроля профиля выпуклых АП.

В основу методов положена базовая схема освещения контролируемой поверхности пучком параллельных лучей, направленных перпендикулярно оси симметрии поверхности (рис.1). В этом случае ширина пучка не превышает стрелки прогиба z АП, а расстояние $h_{кр.}$ от вершины поверхности до крайнего луча отраженного пучка равна примерно трем стрелкам прогиба, т.е. $h_{кр.} \approx 3z$.

Это утверждение справедливо для всех видов АП второго порядка, а

также для сферических поверхностей. Любой луч, отраженный от исследуемой поверхности отклоняется от своего первоначального направления на угол 2φ , где φ – угол между нормалью АП в точке отражения луча и осью симметрии. Анализируя структуру отраженного пучка тем или иным методом, можно определить профиль АП. В этом заключается главный смысл исследований, объединяющий разработанные для контроля профиля выпуклых АП модифицированный метод Гартмана, метод пограничной кривой и интерференционный метод.

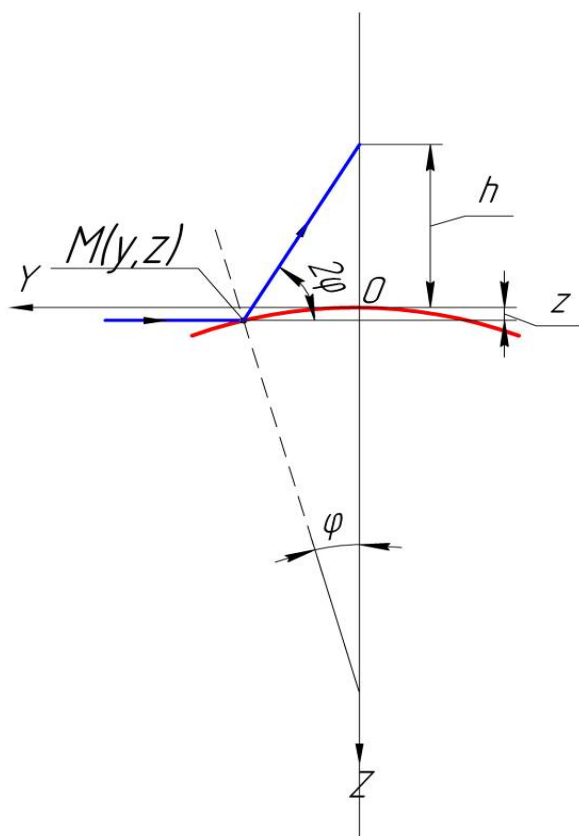


Рис. 1. Базовая схема освещения контролируемой детали

В отличие от известных методов, предлагаемые методы позволяют контролировать не всю поверхность в целом, а сравнительно малые ее участки, охватываемые узким пучком лучей, направленных перпендикулярно оси. Тем не менее, во многих случаях, контроль профиля в производственных условиях представляет важную информацию для управления технологическим процессом, а многократное измерение профиля в различных направлениях позволяет проверить практически всю поверхность. Эта возможность представляется при вращении контролируемой поверхности вокруг ее оси симметрии, при этом положение элементов прибора, реализующих метод измерения, остается неизменным. Анализируя результаты контроля множества меридиональных сечений контролируемой АП, можно сделать заключение о форме всей поверхности в целом. Кроме того, так как углы падения лучей на

контролируемую АП сравнительно велики, это открывает возможность контроля профиля шлифованных поверхностей в видимой области спектра.

Сущность **модифицированного метода Гартмана** иллюстрирована на рис. 2. На поверхность выпуклого зеркала, подлежащего исследованию, направляется вышедший из лазера 1 пучок параллельных лучей, ограниченный диафрагмой 2 с линейным расположением отверстий, выделяющих узкие пучки лучей аналогично классическому методу Гартмана. Лучи, проходящие через отверстия диафрагмы, отражаются от контролируемой поверхности и образуют в плоскости анализа 3 так называемую гартманограмму в виде ряда световых пятен. При измерении координат центров пятен на основании известных геометрических параметров схемы можно определить отклонение формы исследуемой поверхности от теоретического вида.

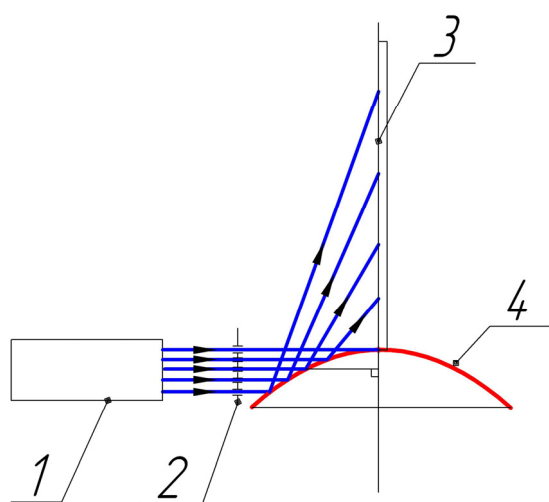


Рис.2. Схема установки для контроля профиля выпуклого зеркала с помощью модифицированного метода Гартмана.

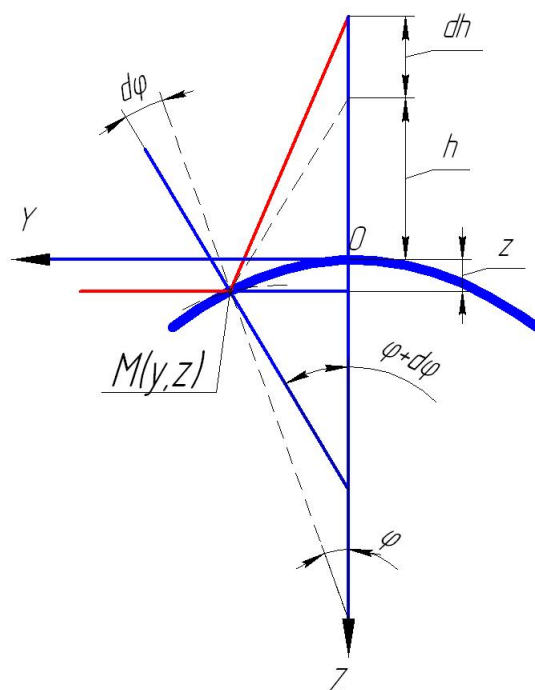


Рис. 3. К выводу зависимости поворота нормали от смещения точки пересечения луча с осью симметрии

Предположим, что исследуемая поверхность представляет собой АП второго порядка. Меридиональная кривая поверхности вращения второго порядка описывается уравнением:

$$y^2 = 2r_0z - (k+1)z^2, \quad (1)$$

где k – коническая константа, $k = -e^2$, e – эксцентриситет, r_0 – радиус кривизны при вершине АП.

Расстояние h от вершины исследуемой поверхности до точки пересечения отраженного луча с осью симметрии поверхности можно найти из следующего соотношения:

$$h = z \frac{k(k+1)z^2 - 2r_0(1+2k)z + 3r_0^2}{(2+3k+k^2)z^2 - 2r_0(2+k)z + r_0^2}. \quad (2)$$

В случае измерения профиля реальных поверхностей, в контрольных точках происходит поворот нормалей вокруг точек встречи лучей с теоретической поверхностью. Как показано на рис. 3, поворот нормали на угол $d\varphi$ вызовет смещение точки пересечения отраженного луча с осью симметрии поверхности на величину dh . Связь между этим смещением и параметрами контролируемой поверхности отражена в формуле:

$$d\varphi = \frac{(A - 2r_0 z)(A + z(h - 2r_0 + z))}{2A\sqrt{h^2 + hz + 2r_0 z - A}(2h^2 + 3hz + z(2r_0 + z) - A)} dh, \quad (3)$$

где $A = \sqrt{z(4h^2 r_0 + (h + 2r_0)^2 z + 2hz^2 + z^3)}$

Таким образом, измерение и контроль профиля выпуклых зеркал с помощью модифицированного метода Гартмана состоит в получении на ПЗС приемнике или фотопластинке гартманогаммы, т.е. системы пятен, число которых равно числу отверстий на диафрагме Гартмана. Измерение координат центров пятен и последующая математическая обработка по разработанной автором методике позволяют получить отклонение углов нормалей контролируемой поверхности от теоретических значений.

Пограничная кривая представляет собой распределение освещенности в изображении темного и светлого полей. Суть **метода пограничной кривой** применительно к решению проблемы контроля профиля выпуклой поверхности заключается в следующем. Если использовать схему освещения параллельным пучком лучей, направленным перпендикулярно оси симметрии контролируемого зеркала, а в световой пучок вводить «нож Фуко» в виде непрозрачного экрана с острым краем, то в плоскости, перпендикулярной меридиональному сечению можно наблюдать границу темного и светлого полей, так называемую границу светотени (рис. 4).

Эта граница будет смещаться в плоскости регистрации при смещении ножа вдоль оси z . Зная координаты перемещения ножа и границы светотени, а также параметры схемы, можно определить отклонения профиля от теоретического вида. Связь между координатой z стрелки прогиба АП, соответствующей координате положения ножа и положением границы аналогична этой же зависимости в методе Гартмана, но отличается от нее физической сущностью. В методе пограничной кривой важное значение имеет распределение интенсивности света на границе светотени вследствие возникновения дифракции на полуплоскости (кромке ножа) при ее освещении монохроматическим излучением.

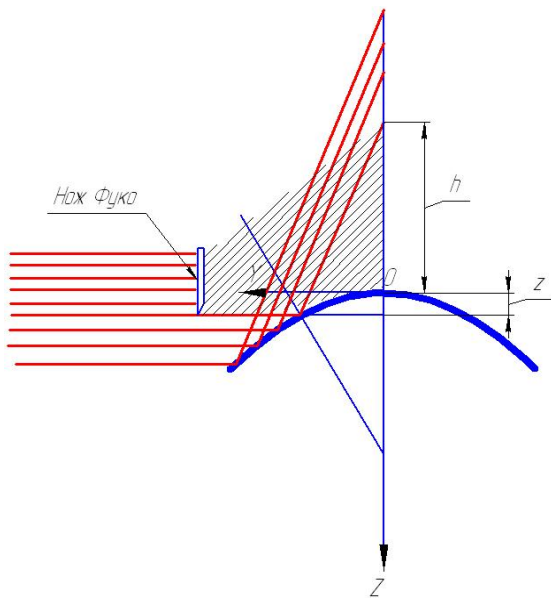


Рис. 4. Схема реализации модифицированного метода пограничной кривой

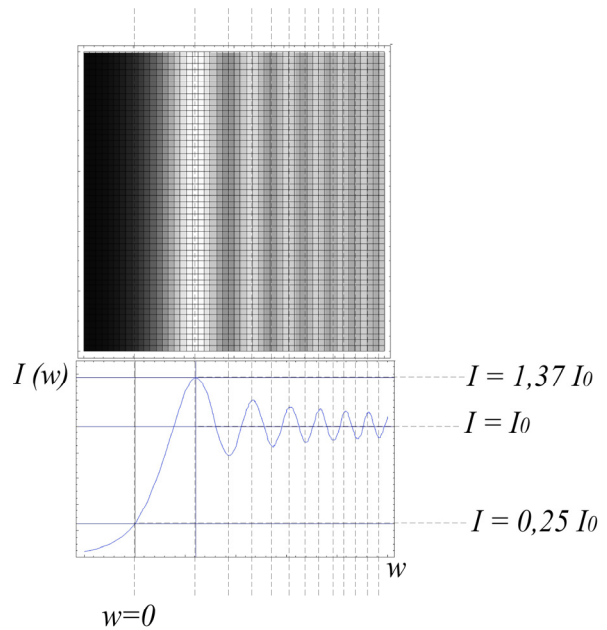


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения $I(h)$ на границе светотени

Для описания дифракционных явлений использована известная формула Френеля-Кирхгофа, геометрической интерпретацией которой является спираль Корню, с помощью которой можно получить распределение интенсивности монохроматического излучения в плоскости регистрации (рис. 5). Показано, что геометрическая граница светотени соответствует значению интенсивности по уровню 0,25 относительно интенсивности излучения I_0 .

Интерференционный метод основан на взаимодействии двух волновых фронтов, один из которых направляется на регистрирующий элемент после отражения от контролируемой поверхности, а другой, минуя ее. При этом в плоскости, перпендикулярной меридиональному сечению и содержащей ось симметрии, возникает интерференционная картина, содержащая информацию о профиле контролируемой АП. Вид интерференционных полос позволяет судить о качестве контролируемой поверхности.

С точки зрения образования интерференционной картины схема аналогична схеме записи изображения голограммы, построенной по первоначальной схеме интерферометра Ллойда.

Схема интерференционного метода контроля показана на рис. 6. Луч 1 отражается от т. $A(y, z)$ контролируемой поверхности и пересекает плоскость регистрации в т. B , куда попадает луч 2, прошедший мимо поверхности. Лучи 1 и 2 интерферируют и в зависимости от разности хода между ними происходит перераспределение интенсивности света в плоскости регистрации. Известно, что в любом двулучевом интерферометре, независимо от его конфигурации, ширина интерференционной полосы b всегда равна отношению длины волны λ

и углу ω , т.е. $b = \lambda/\omega$. Так как угол между интерферирующими лучами ω равен 2φ , то ширина интерференционных полос определяется по формуле $b = \lambda/(2\varphi)$.

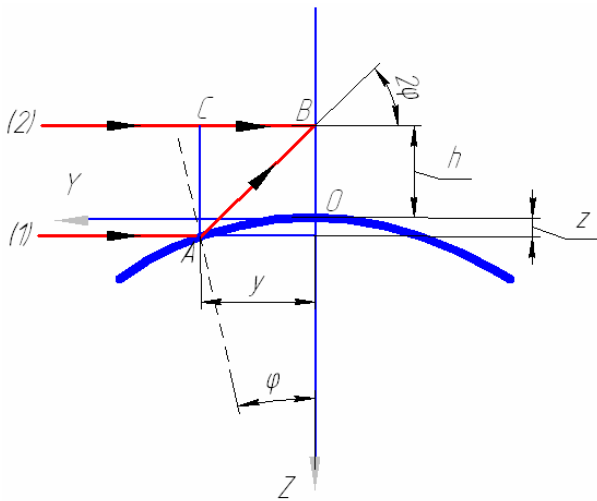


Рис. 6. Схема реализации интерференционного метода

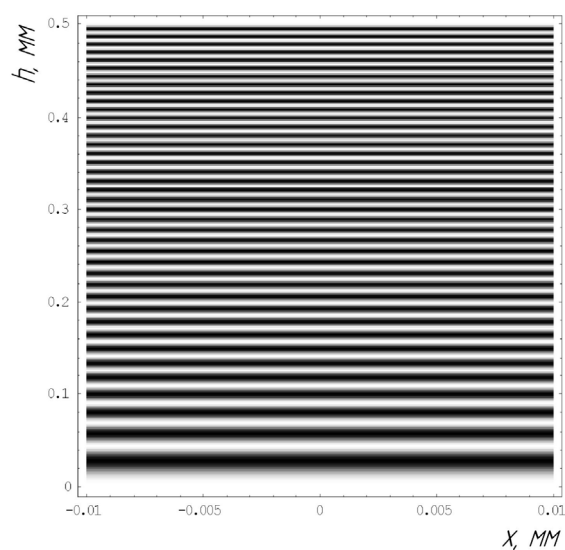


Рис. 7. Теоретический вид интерференционной картины

Разность хода Δl между лучами 1 и 2 равна:

$$\Delta l = \frac{2(2r_0 z - (k+1)z^2)^{\frac{3}{2}}}{(2+3k+k^2)z^2 - 2r_0(2+k)z + r_0^2}. \quad (4)$$

Максимум интенсивности возникнет в точках, где разность хода равна целому числу длин волн:

$$\Delta l = n\lambda. \quad (5)$$

Положение максимума интерференционной полосы h порядка n характеризуется зависимостью:

$$h = \frac{n\lambda}{\text{tg}\varphi} - \frac{r_0(1+(1+k)\text{tg}^2\varphi - \sqrt{1+(1+k)\text{tg}^2\varphi})}{(1+k)(1+(1+k)\text{tg}^2\varphi)}. \quad (6)$$

Связь между смещением максимума интерференционной полосы и поворотом угла φ нормали описывается формулой

$$d\varphi = - \frac{(1+(1+k)\text{tg}^2\varphi)^2}{n\lambda \cos^4\varphi (\sin^{-1}\varphi + k \sin\varphi)^2 + r_0 \cos^2\varphi \text{tg}\varphi \sqrt{1+(1+k)\text{tg}^2\varphi}} dh. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет по отклонению положения максимума интерференционной полосы определить отклонение нормали контролируемой поверхности. Теоретический вид интерференционной картины показан на рис.7 для случая контроля вторичного гиперболического зеркала телескопа VISTA с параметрами: $D_{св.} = 1241\text{мм}$, $r_0 = 4018,81\text{мм}$, $k = -5,548792$, $z_{max} = 46\text{мм}$.

Третья глава диссертации посвящена разработке модифицированного метода Шателен-Ландвера с целью измерения и контроля геометрических параметров выпуклых АП второго порядка.

Предлагаемый автором модифицированный метод Шателен-Ландвера основан на новых, ранее не известных геометрических соотношениях, справедливых для всех видов АП второго порядка.

Метод по своей физической сущности базируется на анализе интерференционной картины, возникающей в воздушном промежутке между эталонной поверхностью и исследуемой АП и в этом смысле аналогичен методу колец Ньютона, применяемого для измерения радиусов сферических поверхностей, но имеет принципиальные отличия от метода колец Ньютона. Эти отличия заключаются в том, что интерпретация интерференционной картины позволяет выявить такие оптические свойства АП, которые недоступны методу колец Ньютона. Если контролируемая поверхность имеет осесимметричную асферическую форму, то интерференционная картина будет иметь вид колец только в том случае, когда точка контакта плоской пластины совпадает с вершиной АП.

Если же пластина будет касаться АП в другой зоне, то интерференционные кольца будут вырождаться в кривые более сложной формы, чем concentric окружности (рис. 8), что связано с неравномерностью толщины воздушного промежутка между плоскостью и АП относительно точки контакта.

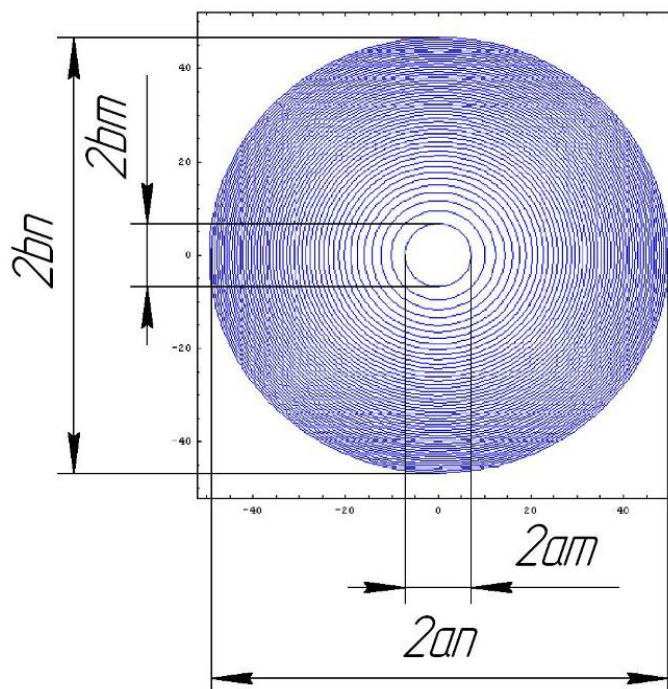


Рис. 8. Вид интерференционной картины, возникающей в воздушном промежутке между плоской эталонной поверхностью и АП

Показано, что при контроле АП вращения второго порядка интерференционные кольца будут иметь форму эллипсов. Для определения

геометрических параметров АП, а также других вспомогательных величин достаточно рассмотреть соотношение полуосей интерференционных колец a и b с различными порядками интерференции n и m в любой зоне АП. Получены зависимости для определения основных геометрических параметров АП по параметрам интерференционной картины:

$$r_0 = \frac{n^2 b_m^2 - m^2 b_n^2}{n m (n-m) \lambda} \sqrt{\frac{b_n^2 - b_m^2}{a_n^2 - a_m^2}}, \quad (10)$$

$$k = -\frac{n m (n-m) \lambda^2 (a_n^2 - a_m^2) - 4(b_n^2 - b_m^2)(n b_m^2 - m b_n^2)}{n m (n-m) \lambda^2 (a_n^2 - a_m^2)}, \quad (11)$$

$$r_s = \frac{n^2 b_m^2 - m^2 b_n^2}{n m (n-m) \lambda}, \quad (12)$$

$$r_t = \frac{(a_n^2 - a_m^2)(n^2 b_m^2 - m^2 b_n^2)}{n m (n-m) \lambda (b_n^2 - b_m^2)}. \quad (13)$$

где r_b , r_s – меридиональный и сагиттальный радиусы кривизны в исследуемой зоне асферической поверхности; n , m – номер интерференционного кольца; a_n , a_m , b_n , b_m – полуоси интерференционных колец.

Для оценки точности модернизированного метода рассмотрено влияние погрешностей Δr_0 и Δk определения r_0 и k :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta r_0}{r_0} = & \frac{a_n}{a_n^2 - a_m^2} \Delta a_n + \frac{a_m}{a_n^2 - a_m^2} \Delta a_m + \frac{b_n((2m^2 + n^2)b_m^2 - 3m^2 b_n^2)}{(b_n^2 - b_m^2)(n^2 b_m^2 - m^2 b_n^2)} \Delta b_n + \\ & + \frac{b_m((m^2 + 2n^2)b_n^2 - 3n^2 b_m^2)}{(b_n^2 - b_m^2)(n^2 b_m^2 - m^2 b_n^2)} \Delta b_m \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta k}{k} = & \frac{8a_n^2(b_n^2 - b_m^2)(n b_m^2 - m b_n^2)}{(a_n^2 - a_m^2)(m n (n-m) \lambda^2 (a_n^2 - a_m^2) + 4n b_m^4 - 4(m+n)b_n^2 b_m^2 + 4m b_n^4)} \Delta a_n - \\ & - \frac{8a_m^2(b_n^2 - b_m^2)(n b_m^2 - m b_n^2)}{(a_n^2 - a_m^2)(m n (n-m) \lambda^2 (a_n^2 - a_m^2) + 4n b_m^4 - 4(m+n)b_n^2 b_m^2 + 4m b_n^4)} \Delta a_m + \\ & + \frac{8b_n(2m b_n^2 - (m+n)b_m^2)}{n m (n-m) \lambda^2 (a_n^2 - a_m^2) + 4n b_m^4 - 4(m+n)b_n^2 b_m^2 + 4m b_n^4} \Delta b_n + \\ & + \frac{8b_m(2n b_m^2 - (m+n)b_n^2)}{n m (n-m) \lambda^2 (a_n^2 - a_m^2) + 4n b_m^4 - 4(m+n)b_n^2 b_m^2 + 4m b_n^4} \Delta b_m, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\Delta a_n, \Delta a_m, \Delta b_n, \Delta b_m$ – погрешности измерения полуосей интерференционных колец.

Выражения (14) и (15) позволяют задать требования, предъявляемые к точности измерения размеров интерференционных колец в зависимости от необходимой точности определения геометрических параметров контролируемого зеркала.

В конечном итоге обработка интерференционной картины позволяет определить вершинный радиус поверхности в любой зоне контакта, а также коническую константу и другие вспомогательные величины исследуемого участка АП, важные для управления технологическим процессом формообразования АП.

Для практической реализации модифицированного метода Шателен-Ландвера предложен интерферометр, принципиальная оптическая схема которого представлена на рис. 9. Здесь: 1 – монохроматический источник света – лазер, 2 – фокусирующий объектив, 3 – точечная диафрагма, 4 – светоделительная куб-призма, 5 – объектив-монохромат, 6 – клиновидная пластина с эталонной плоскостью ЭП, система регистрации интерференционной картины, состоящая из объектива 7 и ПЗС приемника или фотопластинки 8. Особенность оптической системы интерферометра заключается в применении объектива-монохромата особой конструкции, формирующего строго плоский волновой фронт, а также в том, что система, содержащая элементы 5, 4 и 7, представляет собой телескопическую систему типа Кеплера. Входным зрачком этой системы является эталонная плоскость ЭП пластины 6, а ее изображение, построенное телескопической системой – выходным зрачком, в плоскости которого располагается приемник излучения, например матрица ПЗС или фотопластинка. Входным зрачком интерферометра является отверстие диафрагмы 3, а ее изображения, построенные лучами, отраженными от контролируемой и эталонной плоской поверхности поз. 6 являются выходными зрачками интерферометра, расположенными в задней фокальной плоскости объектива 5 и передней фокальной плоскости объектива 7.

Именно такая конструкция оптической системы интерферометра позволяет получить на фотоприемнике наиболее контрастную и энергетически насыщенную интерференционную картину.

Очевидно, что в этом случае размер интерференционной картины равен диаметру выходного зрачка телескопической системы; в конкретной конструкции оптической системы этот диаметр равен 24 мм, т.к. угловое увеличение системы $\gamma = -4.17x$, а диаметр рабочей зоны входного зрачка телескопической системы равен 100 мм.

В процессе контроля весь интерферометр, как готовый прибор, устанавливают над контролируемой поверхностью K в нужной зоне, чтобы оптическая ось $O-O$ интерферометра совпала с нормалью к поверхности в точке

касания эталонной плоской поверхности ЭП пластины 6 с контролируемой АП (рис. 10). Затем регистрируют на ПЗС приемнике или фотопластинке интерференционную картину и по разработанной методике определяют геометрические параметры АП в данной зоне. Сопоставляя результаты измерений геометрических параметров различных зон АП, делают общее заключение о форме поверхности, т.е. о соответствии действительной формы зеркала теоретической.

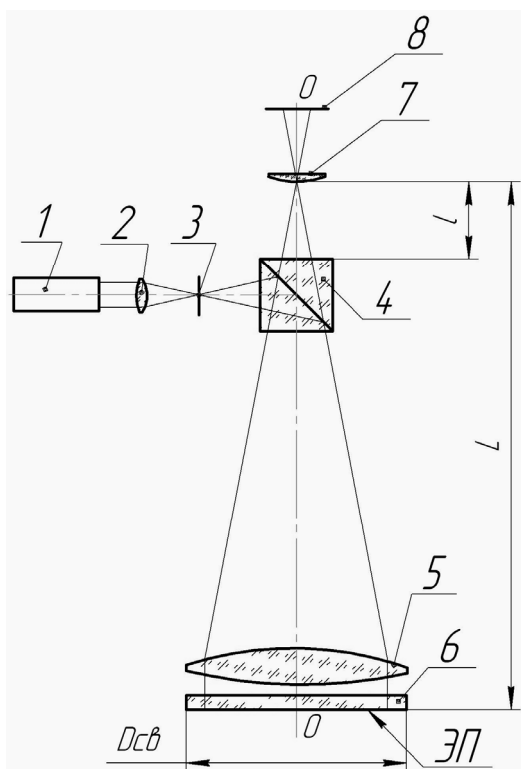


Рис. 9. Оптическая схема интерферометра, реализующая метод Шателен-Ландвера

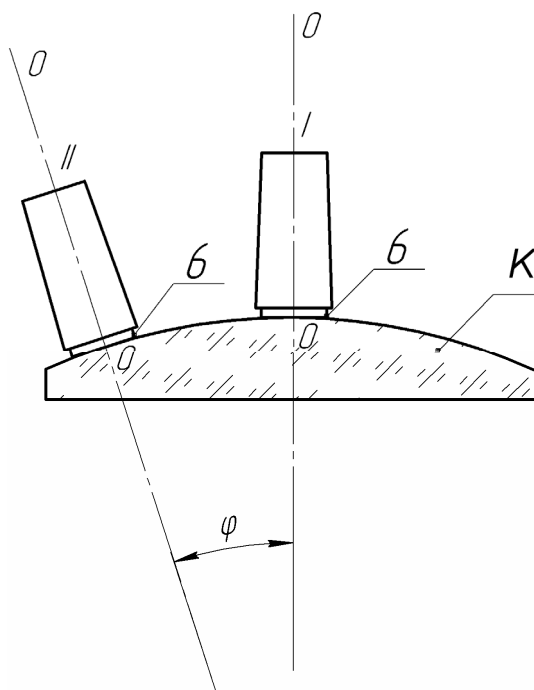


Рис. 10. Траектория перемещений интерферометра по поверхности контролируемой детали

Отмечено, что при необходимости можно произвести расчет интерферометра для длины волны $\lambda = 10,6$ мкм. В этом случае в качестве источника монохроматического излучения используется CO_2 лазер и оптические стекла типа ИКС или материалы $ZnSe$, ZnS , Ge , прозрачные для указанной длины волны, а в качестве приемника – микроболометр, например, марки *NEC HX 3100* с площадкой 640×480 пикселей и размером пиксела $23,5$ мкм. Использование интерферометра, рассчитанного на длину волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм, связано с увеличением ширины интерференционных колец.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложены и разработаны методы измерения и контроля профиля выпуклых асферических зеркал на основе базовой схемы освещения контролируемой поверхности пучком лучей, ориентированным перпендикулярно оси симметрии зеркала.

2. Главное достоинство разработанных методов измерения и контроля профиля выпуклых АП заключается в том, что они не нуждаются в применении высокоточных вспомогательных крупногабаритных оптических элементов.

3. Модифицированный метод Гартмана, пограничной кривой и интерференционный метод перспективны для автоматизации измерений и контроля профиля как шлифованных, так и полированных АП в производственных условиях.

4. Разработан модифицированный интерференционный метод Шателен-Ландвера для измерения и контроля геометрических параметров выпуклых АП второго порядка.

5. Главное достоинство разработанного модифицированного метода Шателен-Ландвера заключается в том, что он позволяет определить вершинный радиус и коническую константу АП второго порядка в любой зоне контролируемой поверхности даже при наличии отверстия в центральной части зеркала.

6. Предложена и разработана оптическая схема интерферометра, реализующая модернизированный метод Шателен-Ландвера для измерения геометрических параметров АП второго порядка.

7. Модифицированный метод Шателен-Ландвера удобен для автоматизации измерений и контроля геометрических параметров АП второго порядка в производственных условиях.

По мнению автора, цель, сформулированная в начале диссертации, достигнута.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дружин В.В., Пуряев Д.Т. Метод Гартмана для контроля формы выпуклых асферических зеркал крупных оптических телескопов // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 12. – С. 4 -7.

2. Пуряев Д.Т., Дружин В.В. Метод Гартмана для контроля формы выпуклых асферических зеркал крупных оптических телескопов // Прикладная оптика – 2006: Сб. трудов МНК. – СПб., 2006. – Т. 1. – С. 311-314.

3. Дружин В.В., Пуряев Д.Т. Интерференционный метод измерения геометрических параметров выпуклых асферических зеркал крупных оптических телескопов // Оптика – 2007: Тез. докл. МНК. – СПб., 2007. – Т. 3. – С. 312.

4. Дружин В.В., Пуряев Д.Т. Оптическая система контактного интерферометра для измерения геометрических параметров выпуклых асферических зеркал крупных оптических телескопов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Четырнадцатая МНТК студентов и аспирантов: Тез. докл. – М., 2008. – Т. 1 – С. 168-170.

5. Дружин В.В, Пуряев Д.Т. Интерференционный метод для контроля профиля выпуклых асферических зеркал // Оптика – 2008: Сб. трудов МНК. – СПб., 2008. – Т. 1. – С. 214-218.