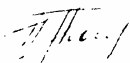


Граф Наталья Анатольевна

**ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЕ КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ГЛАВНЫХ ЗЕРКАЛ
КРУПНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пуряев Даниил Трофимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Бездидько Сергей Николаевич,
заместитель директора НТЦ по науке
ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

кандидат технических наук, доцент
Подобрянский Анатолий Викторович,
начальник отделения инновационных технологий,
главный научный сотрудник АО «НПО
«Оптика»

Ведущая организация: АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,
г. Лыткарино, Московская обл.

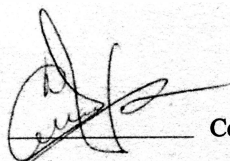
Защита диссертации состоится «21» октября 2015 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

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

Отзыв в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «___» сентября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Семеренко Д.А.

МГТУ
ИМ. Н.Э. БАУМАНА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В последнее время наблюдается интенсивное развитие астрономических приборов, и прежде всего - создание крупных оптических телескопов наземного и космического базирования. Главные зеркала современных телескопов являются асферическими, чаще параболическими или гиперболическими, с относительным отверстием от 1:2 до 1:1. Так, например, в 2009 году начал работу телескоп VISTA, главное зеркало которого является гиперболическим, имеет диаметр 4 метра, относительное отверстие 1:1 и асферичность порядка 0,9 мкм. При этом допустимые отклонения формы поверхности от ее теоретического вида не превышают для видимой области спектра $\lambda/20$. Контроль формы поверхности таких зеркал представляется сложной задачей, так как требует разработки специальных оптических устройств, - в частности, при использовании компенсационного метода контроля, оптических компенсаторов, схемы которых были разработаны В.П. Линником, Д.Д. Максutowым, А. Оффнером, А. Кудэ, Д.Т. Пуряевым и др. Однако большинство из известных схем компенсаторов не пригодны для контроля светосильных крупногабаритных асферических зеркал, так как либо не обеспечивают необходимую точность контроля поверхности, либо конструкция компенсатора оказывается сложной в изготовлении.

С ростом величины относительного отверстия и габаритных размеров главных зеркал современных телескопов существенное влияние на точность контроля формы их поверхности интерференционными методами оказывает так называемая осевая дисторсия, которая возникает при проецировании криволинейной асферической поверхности контролируемого зеркала на плоский фотоприемник и вызывает нарушение отношений координат точек на контролируемой поверхности к координатам их изображений в плоскости приемника. В случае применения компенсационного метода контроля происходит нелинейное преобразование интерференционной картины, приводящее к ее «сжатию» на краю выходного зрачка, а при применении голографического метода возникает это же явление, но в центральной его части. В обоих случаях это явление существенно затрудняет расшифровку интерференционной картины и приводит к ошибке в определении координат точек контролируемой поверхности. На практике традиционным стал математический учет осевой дисторсии, однако его применение значительно увеличивает временные затраты на принятие решения о корректировке технологического процесса.

Таким образом, возникла необходимость поиска и исследования новых возможностей компенсационного метода, основанного на применении зеркально-линзовых компенсаторов, имеющих, по результатам предварительного исследования, преимущества по сравнению с линзовыми и зеркальными системами для контроля формы поверхности светосильных крупногабаритных асферических зеркал.

Цель работы:

Повышение точности и производительности контроля формы поверхности светосильных крупногабаритных асферических зеркал компенсационным методом при обеспечении относительной простоты конструкции компенсатора.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработаны и исследованы новые зеркально-линзовые компенсационные системы для контроля формы поверхности главных зеркал крупных оптических телескопов.
2. Разработаны методики расчета параметров предложенных компенсационных систем и на их основе определены конструктивные параметры компенсаторов для контроля формы поверхности главных зеркал ряда современных телескопов.
3. Оценены преимущества разработанных компенсационных систем по отношению к существующим.
4. Разработана ортоскопическая система интерферометра для контроля формы поверхности светосильных крупногабаритных асферических зеркал.
5. Разработана методика расчета параметров ортоскопической системы интерферометра.

Методы исследования:

Методы расчета оптических систем, базирующиеся на теории аберраций третьего и высших порядков, аналитические и численные методы решения уравнений, методы оптимизации оптических систем.

Объект исследования – оптическая система контроля формы поверхности светосильных крупногабаритных асферических зеркал.

Научная новизна работы:

Впервые решена проблема устранения осевой дисторсии, которая возникает при контроле формы поверхности светосильных крупногабаритных асферических зеркал компенсационным методом.

Практическая ценность работы:

1. Разработаны методики расчета параметров новых зеркально-линзовых компенсаторов для контроля формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал с относительным отверстием от 1:2 до 1:1, которые имеют меньшие габаритные размеры и являются более технологичными по сравнению с известными зеркально-линзовыми и линзовыми компенсаторами.
2. Разработана методика расчета зеркально-линзового компенсатора, который может использоваться в измерительной ветви интерферометра Тваймана—Грина без дополнительной коррекции осевой дисторсии для контроля формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал с относительным отверстием до 1:1.

3. Применение разработанной ортоскопической системы интерферометра для контроля формы поверхности главных зеркал крупных телескопов позволяет исключить процедуру математического учета осевой дисторсии, тем самым существенно сократить продолжительность операций контроля.

Защищаемые научные положения и результаты:

1. Значение осевой дисторсии ортоскопической системы интерферометра для контроля формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал с относительным отверстием от 1:2 до 1:1 не превышает 0,3%.
2. При контроле крупногабаритных асферических зеркал с относительным отверстием от 1:2 до 1:1 предложенные зеркально-линзовые компенсационные системы имеют в 2 раза меньшее значение осевой дисторсии по сравнению с существующими линзовыми.
3. Разработанные методики позволяют рассчитывать параметры технологичных зеркально-линзовых компенсаторов для контроля асферических зеркал с диаметрами от 1,7 до 9 метров и относительными отверстиями от 1:4 до 1:1.

Личный вклад:

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при непосредственном участии автора.

Достоверность результатов работы обеспечена путем корректного применения специализированного программного обеспечения «Mathcad» и «ОПАЛ».

Реализация и внедрение результатов:

Результаты работы использованы в процессе контроля крупногабаритных асферических поверхностей оптических деталей на ОАО «Красногорский завод имени С.А. Зверева», что подтверждается соответствующим актом о внедрении.

Апробация работы и публикации результатов:

Полученные в диссертации научные результаты докладывались на 4 международных конференциях: «Прикладная оптика 2006», Санкт-Петербург, 2006; «Прикладная оптика 2007», Санкт-Петербург, 2007; XIV международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2008; «Оптика-2011», Санкт-Петербург, 2011.

Результаты диссертации изложены в 3 статьях в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов, списка литературы, включающего 75 библиографических ссылок, приложение. Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 14 таблиц и приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и основные задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследований, положения, выносимые на защиту, достоверность и апробация результатов.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния проблемы контроля главных зеркал крупных оптических телескопов.

Приведены параметры главных зеркал ряда современных телескопов. Рассмотрены и проанализированы известные методы их контроля. Проведенный анализ показывает, что в настоящее время одним из наиболее рациональных методов контроля формы поверхности главных зеркал крупных оптических телескопов следует признать компенсационный метод, в котором, в большинстве случаев, используются линзовые компенсаторы.

Проанализированы некоторые известные схемы компенсаторов для контроля формы поверхности главных зеркал телескопов БТА, Т170, ММТ, LBT и VISTA (Рисунок 1). Выявлено, что для контроля зеркал с относительным отверстием от 1:2 до 1:1 наиболее эффективными являются линзовые и зеркально-линзовые компенсаторы. Преимуществом последних является технологичность конструкции: диаметр линзовых компонентов зеркально-линзовых компенсаторов в 2-3 раза меньше диаметра линзовых компенсаторов. Отмечено, что в литературе мало сведений о применении зеркально-линзовых компенсаторов.

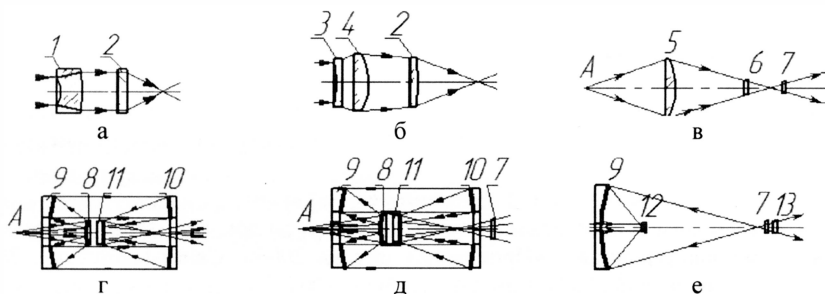


Рисунок 1.

Оптические схемы компенсаторов: (а) линзовый «Кобальт», (б) трехлинзовый компенсатор для контроля формы поверхности главного зеркала телескопа VISTA, (в) трехлинзовый компенсатор для контроля формы поверхности главного зеркала телескопа ММТ, (г) зеркальный «Кобальт», (д) зеркально-линзовый компенсатор для контроля формы поверхности главного зеркала телескопа

VISTA, (е) «Григорианский» компенсатор, где 1 – афокальная линза, 2 – менисковая линза, 3 – вогнуто-плоская линза, 4 – плоско-выпуклая линза, 5 – положительная линзы, 6, 7, 13 – полевые линзы, 8 – выпуклое сферическое зеркало, 9, 10 – вогнутые сферические зеркала, 11 – плоское зеркало, 12 – линза Манжана

Во второй главе диссертации рассмотрены новые конструкции зеркально-линзовых компенсаторов (Рисунок 2), применяемых в измерительной ветви известного интерферометра Тваймана—Грина, и методы их расчета.

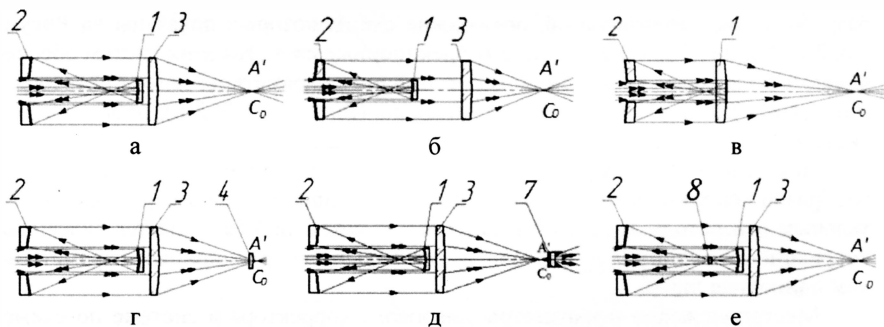


Рисунок 2.

Оптические схемы предложенных зеркально-линзовых компенсаторов (а) трехкомпонентный зеркально-линзовый компенсатор, (б) зеркально-линзовый компенсатор с линзой Манжена 4, (в) зеркально-линзовый компенсатор с двумя линзами Манжена, (г, д) зеркально-линзовый компенсатор с линзовым корректором в виде одиночной линзы 6 или склеенной линзы 7, расположенным вблизи области каустики, локализованной между компенсатором и контролируемой поверхностью, (е) зеркально-линзовый компенсатор с корректором 8, расположенным вблизи области каустики, локализованной внутри компенсатора: 1 – сферическое выпуклое зеркало, 2 – сферическое вогнутое зеркало, 3 – линза, 5 – линза, центральной частью которой является линза Манжена

Характерная особенность предлагаемых зеркально-линзовых компенсаторов заключается в реализации параллельного хода лучей пучка, входящего в измерительную ветвь интерферометра, что важно при выполнении юстировки.

В предложенных системах, в отличие от известных зеркально-линзовых компенсаторов, отсутствуют спайдеры, перекрывающие часть интерференционной картины, в результате чего усложняется процесс контроля и увеличивается его длительность.

Разработаны методики расчета предложенных зеркально-линзовых компенсационных систем.

На первом этапе осуществляется расчет зеркально-линзового компенсатора на базе теории аббераций третьего порядка, при этом необходимо выполнение условия:

$$S_I = S_I^N,$$

где $S_I = \sum_{k=1}^q h_k (\delta\alpha_k / \delta\mu_k)^2 \delta(\alpha_k \mu_k)$ – первая сумма Зейделя, α_k , h_k – угол и высота первого вспомогательного луча на k -ой поверхности компенсатора, $\mu_k = 1/n_k$; S_I^N –

первая сумма Зейделя нормали к контролируемой поверхности; $S_i^N = R_0 \cdot e^2 R_0$, e – радиус кривизны при вершине и эксцентриситет контролируемой поверхности.

Для улучшения коррекционных свойств трехкомпонентного зеркально-линзового компенсатора, оптическая схема которого показана на Рисунке 2 а, разработан ряд модификаций, оптические схемы которых показаны на Рисунках 2 б, 2 в, 2 г, 2 д и 2 е. Лучшие коррекционные свойства этих систем обеспечиваются благодаря увеличению коррекционных параметров: замене некоторых зеркальных компонентов на линзы Манжена (Рисунки 2 б, 2 в), добавлению в систему линзового корректора (Рисунки 2 г, 2 д, 2 е).

Показано, что для зеркал с относительным отверстием от 1:4 до 1:1,5 целесообразно использовать одиночный линзовый корректор, а для зеркал с относительным отверстием 1:1,3 до 1:1 наиболее эффективной оказывается склеенная коррекционная линза, так как она имеет больше коррекционных параметров, чем одиночная линза.

Местоположение и параметры линзового корректора в системе по схеме, представленной на Рисунке 2 г, определяется следующим образом.

Предположим, что наибольший вклад в aberrации высших порядков вносят пятые порядки. В этом случае с достаточной точностью приближения продольная сферическая aberrация компенсационной системы является функцией:

$$f(\beta_{L6}) = \Delta s'_{III(Z-L)} \cdot \beta_{L6}^4 + \Delta s'_{V(Z-L)} \cdot \beta_{L6}^6 + \Delta s'_{L6} + \Delta s'_A, \quad (1)$$

где $\Delta s'_{III(Z-L)}$, $\Delta s'_{V(Z-L)}$ – продольная сферическая aberrация третьего и пятого порядков компенсатора на Рисунке 2, а; $\Delta s'_{L6}$, β_{L6} – продольная сферическая aberrация и линейное увеличение корректора б; $\Delta s'_A$ – продольная сферическая aberrация контролируемой асферической поверхности.

Видно, что такой корректор увеличивает aberrации третьего и пятого порядка компенсатора, представленного на Рисунке 2 а, пропорционально четвертой и шестой степени линейного увеличения β_{L6} , соответственно.

Показано, что если линзовым корректором является одиночная плоско-выпуклая линза, то с достаточной точностью приближения $\Delta s'_{L6}$ представляет собой следующую зависимость:

$$\Delta s'_{L6} = -\frac{\sin^2 \sigma'}{2} \left[\frac{\beta_{L6}^4 \cdot s_{L6} \cdot (1 - n_{L6}^2)}{n_{L6}^2} + \frac{\beta_{L6} \cdot (s_{L6} \cdot n_{L6} - d_{L6}) \cdot (n_{L6} - \beta_{L6})^2 \cdot (n_{L6}^2 - \beta_{L6})}{n_{L6}^3 \cdot (n_{L6} - 1)^2} \right] + \frac{3 \cdot \sin^4 \sigma' \cdot \beta_{L6} \cdot (s_{L6} \cdot n_{L6} - d_{L6}) \cdot (n_{L6} - \beta_{L6})^6 \cdot (n_{L6}^5 - 1)}{40 \cdot n_{L6}^6 \cdot (1 - \beta_{L6}) \cdot (1 - n_{L6})^5},$$

где σ' – выходной апертурный угол, s_{L6} – смещение линзового корректора б относительно центра кривизны контролируемой поверхности, которое для такого типа компенсаторов целесообразно выбрать из диапазона -50 до 0 мм, n_{L6} , d_{L6} – показатель преломления стекла и толщина линзового корректора.

Определяем значение β_{L6} , при котором функция $f(\beta_{L6})$ принимает минимальное по модулю значение. Исследования показали, что для рассматриваемых систем значение $\beta_{L6} < 1,2$. В этом случае значением $\Delta s'_{L6}$ в формуле (1) можно пренебречь.

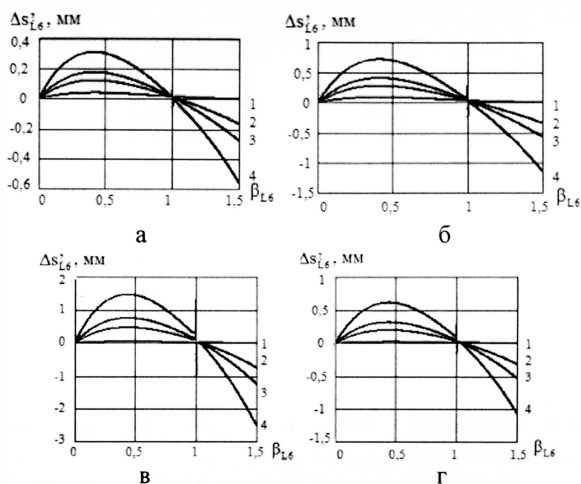


Рисунок 3.

Зависимости $\Delta s'_{L6}(\beta_{L6})$ для контролируемых зеркал с относительным отворствием 1:4 (а), 1:2,78 (б), 1:1,95 (в), 1:1,5 (г) при s_{L6} равным: 0 мм (1); -30 мм (2); -50 мм (3); -100 мм (4)

Используя уравнения углов и высот нулевого луча, получаем формулы для расчета радиуса кривизны второй по ходу лучей поверхности линзы и положение линзового корректора относительно линзы 3 и контролируемой поверхности:

$$r_{L62} = \beta_{L6} \cdot (s_{L6} \cdot n_{L6} - d_5) \cdot (1 - n_{L6}) / n_{L6} \cdot (1 - \beta_{L6}),$$

$$d_4 \cong s'_{F'1-3} - s_{L6}, \quad d_6 \cong R_0 - d_{L6} \cdot \beta_{L6} / n_{L6} - s_{L6} \cdot \beta_{L6},$$

где $s'_{F'1-3}$ – задний фокальный отрезок трехкомпонентного зеркально-линзового компенсатора.

Местоположение и параметры линзового корректора 7 в системе по схеме, представленной на Рисунке 2 д, определяется следующим образом.

Показано, что если линзовым корректором является склеенная линза, у которой первые две по ходу лучей поверхности плоские, то с достаточной точностью приближения $\Delta s'_{L7}$ представляет собой следующую зависимость:

$$\Delta s'_{L7} = \frac{-\sin^2 \sigma' \cdot \beta_{L7}^4 \cdot (s_{L7} \cdot n_{L7.1}^3 \cdot (1 - n_{L7.2}^2) + d_{L7.1} \cdot (n_{L7.2}^2 - n_{L7.1}^2))}{2 \cdot n_{L7.1}^3 \cdot n_{L7.2}^2} -$$

$$- \frac{\sin^2 \sigma' \cdot \beta_{L7} \cdot (s_{L7} \cdot n_{L7.1} \cdot n_{L7.2} - d_{L7.1} - d_{L7.2}) \cdot (n_{L7.2}^2 - \beta_{L7}) \cdot (n_{L7.2} - \beta_{L7})^2}{2 \cdot n_{L7.1} \cdot n_{L7.2}^3 \cdot (n_{L7.2} - 1)^2} +$$

$$+ \frac{3 \cdot \sin^4 \sigma' \cdot \beta_{L7} \cdot (s_{L7} \cdot n_{L7.1} \cdot n_{L7.2} - d_{L7.1} - d_{L7.2}) \cdot (n_{L7.2} - \beta_{L7})^6 \cdot (n_{L7.2}^5 - 1)}{40 \cdot n_{L7.1} \cdot n_{L7.2}^6 \cdot (1 - \beta_{L7}) \cdot (1 - n_{L7.2})^5},$$

где $n_{L7.1}$, $n_{L7.2}$ – показатели преломления стекол; $d_{L7.1}$, $d_{L7.2}$ – толщины линзового корректора; s_{L7} – смещение линзового корректора относительно центра кривизны контролируемой поверхности, которое для такого типа компенсаторов целесообразно выбрать из диапазона от 0 до 400 мм.

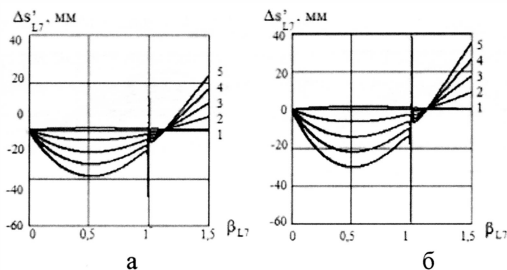


Рисунок 4.

Зависимости $\Delta s'_{L6}(\beta_{L6})$ для контролируемых зеркал с относительным отверстием 1:1,25 (а) 1:1 (б) при s_{L6} равным: 0 мм (1); 100 мм (2); 200 мм (3); 300 мм (4); 400 мм (5)

Определяем значение β_{L7} , при котором функция $f(\beta_{L7})$ принимает минимальное по модулю значение.

Используя уравнения углов и высот нулевого луча, получаем формулы для расчета радиуса кривизны третьей по ходу лучей поверхности линзы и положение линзового корректора относительно линзы 3 и контролируемой поверхности:

$$r_{L7.3} = \beta_{L7} \cdot (s_{L7} \cdot n_{L7.1} \cdot n_{L7.2} - d_{L7.1} - d_{L7.2}) \cdot (1 - n_{L7.2}) / (1 - \beta_{L7}) \cdot n_{L7.1} \cdot n_{L7.2},$$

$$d_4 \equiv s'_{F1-3} + s_{L7}, \quad d_7 \equiv R_0 + s_{L7} \cdot \beta_{L7} - d_{L7.1} \cdot \beta_{L7} / n_{L7.1} - d_{L7.2} \cdot \beta_{L7} / n_{L7.2}.$$

Местоположение и параметры линзового корректора 8 в системе по схеме, представленной на Рисунке 2 е, определяется следующим образом.

Предположим, что наибольший вклад в aberrации высших порядков вносят пятые порядки. В этом случае с достаточной точностью приближения продольная сферическая aberrация компенсационной системы является функцией:

$$f(\beta_{L8}) = \Delta s'_{III(1)} \cdot \beta_{L8}^4 \cdot \beta_{2-3}^4 + \Delta s'_{V(1)} \cdot \beta_{L8}^6 \cdot \beta_{2-3}^6 + f_{L8} + \Delta s'_{2-3} + \Delta s'_A, \quad (2)$$

где $\Delta s'_{III(1)}$, $\Delta s'_{V(1)}$ - продольная сферическая aberrация третьего и пятого порядков зеркала 1; $f_{L8} = \Delta s'_{III(L8)} \cdot \beta_{2-3}^4 + \Delta s'_{V(L8)} \cdot \beta_{2-3}^6$; $\Delta s'_{III(L8)}$, $\Delta s'_{V(L8)}$ - продольная сферическая aberrация третьего и пятого порядков линзового корректора 8; $\Delta s'_{2-3}$, β_{2-3} - продольная сферическая aberrация и линейное увеличение системы, состоящей из зеркала 2 и линзы 3; α - угол первого вспомогательного луча; s_{L8} для такого типа компенсаторов целесообразно выбрать из диапазона от -30 до 0 мм.

Показано, что если линзовым корректором является выпукло-плоская линза, то с достаточной точностью приближения функция f_{L8} представляет собой следующую зависимость:

$$f_{L8} = \frac{\sin^2 \sigma'}{2} \cdot \beta_{2-3}^4 \cdot \left[\frac{(s_{L8} \cdot n_{L8} - d_{L8} \cdot n_{L8} + d_{L8}) \cdot (1 - \beta_{L8} \cdot n_{L8})^2 \cdot (n_{L8}^2 \cdot \beta_{L8} - 1)}{n_{L8}^3 \cdot (n_{L8} - 1)^2} + \frac{(s_{L8} \cdot \beta_{L8} \cdot n_{L8} - d_{L8}) \cdot (1 - n_{L8}^2)}{n_{L8}^3} \right],$$

$$+ \beta_{2-3}^6 \cdot \frac{3 \cdot \sin^4 \sigma' \cdot (s_{L8} \cdot n_{L8} - d_{L8} \cdot n_{L8} + d_{L8}) \cdot \beta_{L8} \cdot (\beta_{L8} \cdot n_{L8} - 1)^6 \cdot (n_{L8}^5 - 1)}{40 \cdot n_{L8}^6 \cdot (\beta_{L8} - 1) \cdot (n_{L8} - 1)^3}$$

где n_{L8} - показатель преломления стекла; d_{L8} - толщина линзового корректора; s_{L8} - смещение линзового корректора относительно фокуса зеркала 2.

Определяем значение β_{L8} , при котором функция $f(\beta_{L8})$ принимает минимальное по модулю или близкое к минимальному значение.

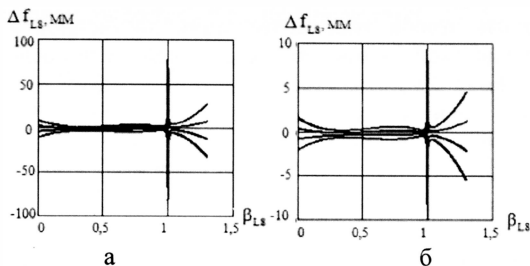


Рисунок 5.

Зависимости $\Delta s'_{L8}(\beta_{L8})$ для контролируемых зеркал с относительным отверстием 1: 4 (а), 1: 2,78 (б) при s_{L7} : 5 мм (1); 0 мм (2); -5 мм (3); -10 мм (4)

Исследования показали, что для рассматриваемых систем значение $\beta_{L6} < 1$. В этом случае составляющей f'_{L8} в формуле (2) можно пренебречь.

Используя уравнения углов и высот нулевого луча, получаем формулы для расчета радиуса кривизны второй по ходу лучей поверхности линзы и местоположения линзового корректора относительно зеркал 1 и 2:

$$r_{L1} = (s_{L8} \cdot n_{L8} - d_{L8} \cdot (n_{L8} - 1)) \cdot (1 - n_{L8}) / n_{L8} \cdot (\beta_{L8} - 1),$$

$$d_1 \cong (s'_{F1} - s_{L8} - d_{L8}) \cdot \beta_{L8}, \quad d_3 \cong s_{F2} + s_{L8} - d_{L8},$$

где s'_{F1} – задний фокальный отрезок зеркала 1; s_{F2} – передний фокальный отрезок зеркала 2.

Заключительный этап расчета компенсационных систем – оптимизация. Разработаны оптимизационные модели для каждого из предложенных типов компенсаторов. Наиболее рациональным методом оптимизации компенсационных систем является демпфированный метод наименьших квадратов, сочетающий положительные свойства метода быстрого спуска и метода наименьших квадратов, а также сочетает преимущества градиентных и ньютоновских методов, в связи с чем, имеет лучшую сходимость. В качестве параметров, оптимизации рекомендуется использовать значения кривизны поверхностей и воздушных промежутков, а оптимизируемые функции рационально связать с Церниковскими глобальными полихроматическими коэффициентами разложения волновой аберрации по ортогональному базису. Стоит отметить, что оптимизация компенсационных систем светосильных крупногабаритных асферических зеркал проводится в несколько этапов. На первом этапе осуществляется оптимизация компенсационной системы, в которой контролируемая поверхность задана через так называемый имитатор асферической поверхности, который позволяет избавиться от расчета компенсационной системы в автоколлимационном ходе лучей. Это позволяет избежать затруднений при оптимизации, связанных с непрохождением лучей через какой-либо оптический компонент. Так как существующие программы расчета оптических систем позволяют вводить показатели преломления

с точностью только до 6 знака, появляется погрешность в описании имитатора контролируемой асферической поверхности. Для устранения этой ошибки необходимо производить второй этап оптимизации полученной компенсационной системы, но уже в автоколлимационном ходе лучей. Если после оптимизации не достигается требуемая абберационная коррекция, следует изменить начальные условия, например, смещение линзового корректора относительно области каустики или его линейное увеличение, и повторить расчет сначала.

По приведенным методикам рассчитаны параметры компенсаторов для контроля формы поверхности главных зеркал телескопов БТА, Т170, 2-m Wendelstein Fraunhofer, TNT, MMT и VISTA. В Таблице 1 приведены параметры полученных и известных компенсационных систем: световой диаметр D_k , длина L_k и диаметр линзовой части D_L компенсатора (только для зеркально-линзовых компенсаторов). Остаточная волновая абберация компенсационных систем в автоколлимационном ходе лучей менее $\lambda/15$.

Таблица 1.

Параметры ряда компенсационных систем для различных типов компенсаторов

Рисунок оптиче- ской схе- мы ком- пенсатора	D_k , мм; L_k , мм; D_L , мм для главных зеркал телескопов (D , м; $D:f$ ')						
	БТА (6; 1:4)	T170 (1,7; 1:2,78)	Fraunhofer (2,1; 1:1,95)	TNT (2,4; 1:1,5)	MMT (6,5; 1:1,25)	LBT (8,4; 1:1,14)	VISTA (4; 1:1)
1 а	30; 144	—	—	—	—	—	—
1 б	—	—	—	—	—	—	303; 445
1 в	—	—	—	—	270; 643	—	—
1 г	—	64; 400	—	—	—	—	—
1 д	—	—	—	—	—	—	430; 730; 150
1 е	—	—	—	—	750; 1700; 100	750; 1850; 90	—
2 б	30; 320; 30	46; 450; 46	—	—	—	—	—
2 в	—	76; 550; 76	—	—	—	—	—
2 г	22; 243; 22	31; 260; 30	71; 405; 64	75; 353; 62	—	—	—
2 д	—	—	—	—	181; 676; 140	—	220; 777; 133
2 е	72; 220; 69	123; 418; 122	—	—	—	—	—

Видно, что наиболее удачным вариантом из предложенных типов зеркально-линзовых компенсаторов является компенсатор, оптическая схема которого показана на Рисунке 2 д, так как при контроле формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал с относительным отверстием от 1:2 до 1:1 компенсаторы такого типа в 1,5 раза меньше по диаметру линзовых и в 2 раза меньше известных зеркально-линзовых компенсаторов.

Показано, что компенсаторы, рассчитанные по разработанным методикам, могут применяться для контроля формы ряда асферических поверхностей с различным сочетанием диаметров и эксцентриситетов.

В третьей главе рассмотрена проблема исправления осевой дисторсии, возникающей при компенсационном методе контроля крупногабаритных светосильных асферических зеркал и проявляющейся в виде нарушения отношения координаты точки на контролируемой поверхности к координате ее изображения в плоскости фотоприемника в осевом пучке.

Осевая дисторсия может быть записана в виде:

$$\Delta\beta = (\beta - \beta_0) / \beta_0,$$

где $\beta_0 = f'_{ок} / R_0$ - параксиальное линейное увеличение компенсатора, $\beta = h / Y$ – линейное увеличение компенсатора; $f'_{ок}$ – фокусное расстояние компенсатора, R_0 – вершинный радиус контролируемого зеркала, h – высота на выходе компенсационной системы, Y – высота на контролируемой поверхности.

В Таблице 2 приведены значения осевой дисторсии $\Delta\beta$ ряда известных и разработанных компенсационных систем.

Таблица 2.

Осевая дисторсия ряда компенсационных систем
для различных типов компенсаторов

Рисунок оптиче- ской схе- мы ком- пенсатора	Значение $\Delta\beta$, % для главных зеркал телескопов (D, м; D:f')						
	БТА (6; 1:4)	T170 (1,7; 1:2,78)	Fraunhofer (2,1; 1:1,95)	TNT (2,4; 1:1,5)	MMT (6,5; 1:1,25)	LBT (8,4; 1:1,14)	VISTA (4; 1:1)
1 а	—	12,2	—	—	—	—	—
1 б	—	—	—	—	—	—	20,8
1 в	—	—	—	—	9,7%	—	—
1 г	—	1,1	—	—	—	—	—
1 д	—	—	—	—	—	—	15,6
1 е	—	—	—	—	3,6	4,4	—
2 б	4,7	3,2	—	—	—	—	—
2 в	—	0,6	—	—	—	—	—
2 г	2,7	2,3	3	4	—	—	—
2 д	—	—	—	—	3	—	5,6
2 е	1,2	0,7	—	—	—	—	—

С ростом значения относительного отверстия контролируемой поверхности значение осевой дисторсии увеличивается, и для главного зеркала телескопа VISTA, относительное отверстие которого 1:1, достигает 21%. Важно заметить, что для зеркальных и зеркально-линзовых компенсационных систем значение осевой дисторсии меньше, чем для линзовых. Например, для компенсационных систем с зеркально-линзовым компенсатором с линзовым корректором в области каустики (Рисунок 2, г) осевая дисторсия составляет от 2 до 6%,

что вполне допустимо в большинстве практических случаев. Этот факт является существенным достоинством компенсаторов такого типа, так как позволяет применять его в измерительной ветви интерферометра Тваймана–Грина без дополнительной коррекции осевой дисторсии.

В настоящее время для достоверного контроля формы асферических поверхностей в обязательном порядке применяются, как минимум, два различных метода контроля или компенсационный метод контроля с применением двух компенсаторов, конструкции которых отличаются. В связи с этим возникла необходимость разработки второго варианта системы для контроля формы поверхности светосильных крупногабаритных асферических зеркал, в которой осевая дисторсия также исправлена.

Предложена ортоскопическая система интерферометра (Рисунок 6), которая является вторым вариантом системы для контроля формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал с исправленной осевой дисторсией.

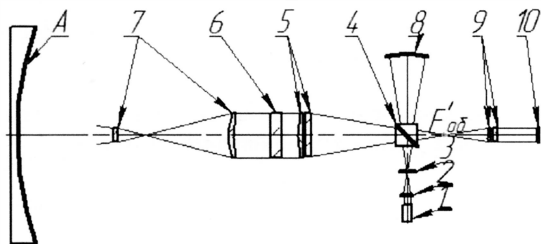


Рисунок 6.

Оптическая схема ортоскопической системы интерферометра: А - контролируемая асферическая поверхность, 1 – лазер, 2 – конденсор, 3 – диафрагма, 4 – светоделительный куб, 5 – объектив измерительной ветви, 6 – плоскопараллельная пластина, 7 - компенсатор, 8 – эталонное сферическое зеркало, 9 – объектив сопряжения измерительной ветви, 10 – ПЗС матрица

Ключевыми элементами ортоскопической системы интерферометра являются компенсатор 7, компенсирующий aberrации нормалей асферической поверхности, и объектив сопряжения 9, обеспечивающий проецирование интерференционной картины на ПЗС матрицу 10 с постоянным масштабом.

Плоскопараллельная пластинка 6 установлена в выходном зрачке компенсационной системы и служит разделительным элементом интерферометра.

Разработана методика расчета ортоскопической системы интерферометра, сущность которой заключается в последовательном расчете основных узлов системы: компенсационной системы, состоящей из линзового компенсатора и контролируемой поверхности; блока измерительной ветви, состоящего из плоскопараллельной пластины, объектива и светоделительного кубика; объектива сопряжения измерительной ветви.

В этой системе может применяться любой известный тип компенсатора, обеспечивающий необходимую точность контроля формы поверхности, но це-

лесообразно применение одного из линзовых компенсаторов, которые являются наиболее распространенными. Пусть, например, компенсатор состоит из положительной менисковой линзы и линзового корректора, расположенного вблизи области каустики Методика расчета компенсаторов такого типа аналогична методике расчета зеркально-линзового компенсатора, схема которого показана на Рисунке 2, г.

Расчет объектива измерительной ветви производится по известной методике. Перед объективом на заданном расстоянии необходимо расположить плоскопараллельную пластину, а между объективом и объективом сопряжения на заданном расстоянии от заднего фокуса объектива - светоделительный куб.

Объектив измерительной ветви и объектив сопряжения измерительной ветви образуют телескопическую систему; при этом последний фактически является окуляром телескопической системы, фокусное расстояние которого вычисляется по формуле:

$$f'_{ob.s.} = -f'_{ob.} \cdot \beta_T,$$

где $\beta_T = \beta_\Sigma / \beta_0$ – линейное увеличение телескопической системы; $f'_{об.}$ – заднее фокусное расстояние объектива измерительной ветви; $\beta_\Sigma = m'_k / Y_k$ – линейное увеличение всей системы, m'_k – требуемое значение высоты крайнего луча в плоскости ПЗС матрицы, $Y_k = D/2$ – высота крайнего луча на контролируемой поверхности, D – световой диаметр контролируемой поверхности; $\beta_0 = -f'_k / R_0$ – линейное увеличение компенсационной системы, f'_k – заднее фокусное расстояние компенсатора.

Поперечная абберация лучей в плоскости приемника:

$$\Delta m_i = m_i - m'_i,$$

где $m_i = h_i \cdot \beta_T$ – фактическое значение высоты i -го луча на ПЗС матрице; $m'_i = Y_i \cdot \beta_\Sigma$ – требуемое значение высоты i -го луча на ПЗС матрице; Y_i, h_i – высота i -го луча на контролируемой поверхности и компенсаторе, соответственно.

Расчет объектива сопряжения измерительной ветви сводится к типовому расчету окуляра телескопической системы с заданными значениями поперечной абберации Δm_i с одновременным обеспечением оптического сопряжения криволинейной контролируемой поверхности и плоской поверхности приемника.

По приведенной методике выполнены расчеты ортоскопических систем интерферометра для контроля формы поверхности главных зеркал телескопов 2-m Wendelstein Fraunhofer, TNT и VISTA.

Остаточная волновая абберация компенсационной системы в автоколлимационном ходе лучей для контроля формы поверхности главного зеркала телескопа VISTA не превышает $\lambda/125$, TNT – $\lambda/150$, для главного зеркала телескопа 2-m Wendelstein Fraunhofer – на порядок меньше. Осевая дисторсия компенсационной системы для контроля формы поверхности главного зеркала телескопа VISTA составляет 20%, TNT – 11%, 2-m Wendelstein Fraunhofer – 6%. Осевая дисторсия ортоскопической системы интерферометра не превышает 0,3% (Рисунок 7). В результате максимальная линейная погрешность ΔY определения координаты на асферической поверхности не превышает $3 \cdot 10^{-3}$ м, что меньше диаметра наимень-

шего полировальника, применяемого при изготовлении крупногабаритных зеркал; а погрешность Δm определения координаты в плоскости ПЗС матрицы не превышает $8 \cdot 10^{-6}$ м, что сопоставимо с одним элементом качественной матрицы.

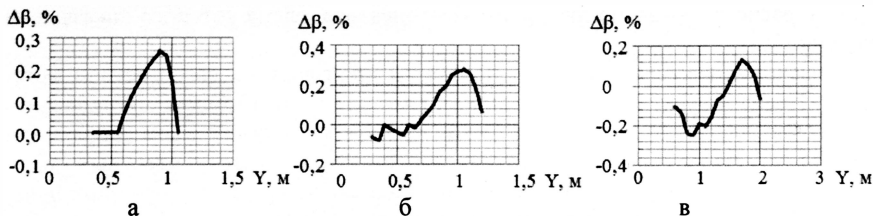


Рисунок 7.

Зависимости $\Delta\beta(Y)$ ортоскопической системы интерферометра для контроля формы поверхности главных зеркал телескопов 2-m Wendelstein Fraunhofer (а), TNT (б), VISTA (в)

Произведем оценку погрешности определения координат на контролируемой асферической поверхности А при формировании интерференционной картины в виде полос, получаемой в результате наклона плоскопараллельной пластины 6 на угол α . В этом случае произойдет смещение лучей, как показано на Рисунке 8.

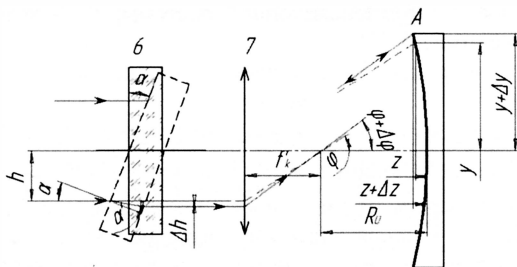


Рисунок 8.

Оптическая схема формирования интерференционных полос

В результате тригонометрических преобразований, используя соотношения, справедливые для асферических поверхностей второго порядка, получены функциональные зависимости погрешности определения координаты на контролируемой поверхности от угла α наклона пластины.

Погрешность Δh координаты h на поверхности пластины 6:

$$\Delta h = d \cdot \cos \alpha \cdot [\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}(\alpha / n)],$$

где d , n , α – толщина, показатель преломления стекла и угол наклона пластины 6.

Погрешность Δz координаты z на контролируемой поверхности А:

$$\Delta z = -R_0 \pm R_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{(h + \Delta h)^2}{(e^2 - 1) \cdot [(e^2 - 1) \cdot (h + \Delta h)^2 - f'^2]}} - z.$$

Погрешность Δy координаты y на контролируемой поверхности А:

$$\Delta y = (R_0 - (z + \Delta z)) \cdot (h + \Delta h) / f'_k - y.$$

Если считать, что минимальный размер интерференционной полосы, различимый на ПЗС матрице, составляет 2 элемента матрицы (2р), то, используя выражения интерференционной оптики, получаем ограничение для угла α :

$$\alpha \leq \lambda \cdot n \cdot \beta_{t.s.} / 2 \cdot p \cdot (n-1),$$

где λ – длина волны, n – показатель преломления стекла пластины, $\beta_{t.s.}$ – линейное увеличение телескопической системы, состоящей из объектива измерительной ветви и объектива сопряжения.

Полученные зависимости позволяют оценить значение угла α и соответствующие ему погрешности Δz , Δy . Для главных зеркал телескопов, например, 2-m Wendelstein Fraunhofer, TNT и VISTA они составляют: $\alpha \leq 0,01$ рад, $\Delta z = \pm 0,26$ мм, $\Delta y = \pm 2$ мм; $\alpha \leq 0,01$ рад, $\Delta z = \pm 0,45$ мм, $\Delta y = \pm 2,7$ мм; $\alpha \leq 0,004$ рад, $\Delta z = \pm 0,31$ мм, $\Delta y = \pm 1,25$ мм. соответственно.

Значения полученных погрешностей допустимы в большинстве практических случаев.

Таким образом, разработаны два варианта оптической системы для контроля формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал с практически исправленной осевой дисторсией, в которых применяются компенсаторы разного типа, тем самым обеспечивается достоверность получаемых результатов контроля.

В заключении сформулированы общие выводы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложены, разработаны и исследованы новые типы зеркально-линзовых компенсаторов для контроля формы поверхности главных зеркал крупных современных телескопов. Выявлено, что при контроле формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал с относительным отверстием от 1:2 до 1:1 разработанный зеркально-линзовый компенсатор с линзовым корректором, расположенным вблизи области каустики, локализованной между компенсатором и контролируемой поверхностью, в 1,5 раза меньше по диаметру линзовых и в 2 раза меньше известных зеркально-линзовых компенсаторов. Значение осевой дисторсии новых компенсационных систем более чем в 2 раза меньше по сравнению с существующими линзовыми системами.
2. Разработанные методики расчета параметров предложенных зеркально-линзовых компенсационных систем позволяют получать компенсаторы для контроля формы поверхности различных крупногабаритных асферических зеркал с относительными отверстиями до 1:1, в частности главных зеркал телескопов БТА, Т170, 2-m Wendelstein Fraunhofer, TNT, MMT и VISTA.
3. Показано, что минимальные осевые смещения компонентов в оптических системах разработанных компенсаторов позволяют увеличить возможное количество параметров контролируемых асферических поверхностей с различными сочетаниями диаметров и эксцентриситетов.
4. Разработаны два варианта оптической системы для контроля формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал с практически исправленной

осевой дисторсией, в которых применяются компенсаторы разного типа, тем самым обеспечивается достоверность получаемых результатов контроля.

5. Разработанный зеркально-линзовый компенсатор с линзовым корректором, расположенным вблизи области каустики, локализованной между компенсатором и контролируемой поверхностью, может использоваться в измерительной ветви интерферометра Тваймана—Грина без дополнительной коррекции осевой дисторсии для контроля формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал с относительным отверстием до 1:1; при этом значение осевой дисторсии компенсационных систем не превышает 6%, что в 2,5 раза меньше, чем у известных зеркально-линзовых, и 3,5 раза меньше, чем у известных линзовых компенсационных систем.

6. Разработанная ортоскопическая система интерферометра позволяет решить проблему устранения осевой дисторсии возникающей при контроле формы поверхности светосильных главных зеркал крупных телескопов компенсационным методом. Осевая дисторсия полученной системы не превышает 0,3%.

7. Разработана методика расчета параметров ортоскопической системы интерферометра, которая позволяет получать системы для контроля формы поверхности различных светосильных крупногабаритных асферических зеркал.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пуряев Д.Т., Граф Н.А. Зеркально-линзовые компенсационные системы для контроля формы главных зеркал крупных телескопов // Оптический журнал. 2007. Т.74, № 12. С. 8-9. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

2. Метод фазирования сегментированного главного зеркала радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон» / Д.Т. Пуряев [и др.] // Измерительная техника. 2014. №11. С. 62-64. (0,38 п.л. / 0,09 п.л.).

3. Граф Н.А., Пуряев Д.Т. Оптическая система интерферометра для контроля формы крупногабаритных светосильных зеркал компенсационным методом // Наука и образование. МГТУ имени Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2013. №11. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/1113.0654983>. (1,04 п.л. / 0,7 п.л.).

4. Граф Н.А., Пуряев Д.Т. Зеркально-линзовые компенсационные системы для контроля формы главных зеркал крупных телескопов // Прикладная оптика – 2006: Сб. трудов МНК. СПб, 2006. Т. 1. С. 283-285. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

5. Граф Н.А., Пуряев Д.Т. Зеркально-линзовые компенсационные системы с линзами Манжена для контроля формы главных зеркал оптических телескопов // Оптика – 2007: Тез. докл. МНК. СПб, 2007. Т.3. С.253-254. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

6. Граф Н.А., Пуряев Д.Т. Зеркально-линзовые компенсационные системы для контроля формы главных зеркал оптических телескопов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Четырнадцатая МНТК студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. М., 2008. Т. 1. С. 167-168. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

7. Граф Н.А., Пуряев Д.Т. Оптическая система ортоскопического интерферометра // Оптика – 2011: Тез. докл. МНК. СПб: НИУ ИТМО, 2011. Т.1. С. 136-138. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).