

УДК 681.7.028.24

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЭКСЦЕНТРИЧНО РАСПОЛОЖЕННОЙ АСФЕРИЧЕСКОЙ ЛИНЗОЙ*

Р. К. Насыров¹, А. Г. Полещук¹, М. Н. Сокольский², В. П. Трегуб²

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Акционерное общество «ЛОМО»,
194044, Санкт-Петербург, ул. Чугунная, 20
E-mail: NasyrovRK@iae.sbras.ru

Предложен интерферометрический метод контроля качества сборки трёхлинзового блока со смещённой асферической линзой нецентрированной девятикомпонентной оптической системы авиационного наשלемного широкоугольного дисплейного коллиматора. Показано, что такой метод юстировки позволяет установить оптические компоненты, в том числе эксцентрично расположенную асферическую линзу, с погрешностью единицы микрон. Метод является бесконтактным и даёт возможность контролировать положение линз внутри корпуса прибора.

Ключевые слова: интерферометр, дифракционная оптика, юстировка, оптический контроль.

DOI: 10.15372/AUT20170512

Введение. В настоящее время актуальной проблемой оптической промышленности является сборка и юстировка сложных многокомпонентных линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых систем, в том числе с асферическими и децентрированными поверхностями. Причём для оптических систем, используемых в астрономии и аэрокосмической отрасли, необходимо обеспечить высокое качество сборки.

Для сборки сложных оптических систем широко применяются лазерные трекары [1] и координатно-измерительные машины [2], которые могут определять положение механических или оптических элементов с погрешностью до нескольких микрон. Однако механическая компоновка системы часто ограничивает доступ сенсора координатно-измерительных машин или блокирует линию визирования лазерного трекара. Кроме того, оптические поверхности, особенно с покрытиями, не должны иметь механических контактов с сенсорами.

Неконтактные методы юстировки и центрировки линз при сборке обычных объективов хорошо известны и широко применяются в практике оптического приборостроения [3]. Центрировку линз, как правило, осуществляют по наблюдению автоколлимационных бликов от контролируемой поверхности при её вращении. Используемые для этих целей автоколлиматоры и юстировочные телескопы имеют малые габариты, высокую точность и позволяют проводить контроль сборки в реальном времени. Однако погрешность этих методов растёт с увеличением расстояния до контролируемой поверхности, сама поверхность должна иметь возможность вращаться, а юстировка осуществима, как правило, только вдоль оптической оси, т. е. данный метод не применим для юстировки эксцентрич-

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01721) и частичной поддержке Сибирского отделения РАН (интеграционный проект № 112).

но расположенных поверхностей. Существенным недостатком автоколлимационного метода является отсутствие вероятности контроля величины воздушных промежутков между линзами.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ), которые позволяют формировать практически любой волновой фронт и/или фокусировать свет в заданную область пространства, нашли широкое применение в устройствах юстировки оптических систем с использованием телескопов [4], интерферометров [5] или видеокамер [6]. Базовым принципом их применения является возможность размещения на одной оптической подложке нескольких дифракционных структур, пространственно разнесённых или перекрывающихся [7], каждая из которых преобразует световой поток по заданному закону. Причём взаимное положение этих структур (например, их центров) выдерживается при изготовлении с погрешностью менее 0,1 мкм [8, 9]. Для контроля поверхности крупногабаритных асферических зеркал используются ДОЭ, состоящие из главной структуры, окружённой несколькими вспомогательными фокусирующими дифракционными элементами. Вспомогательные элементы обычно формируются вне световой апертуры зеркала маркерами (например, кресты) в строго заданных позициях [6], в которых установлены видеокамеры. Однако этот метод юстировки облегчает только первоначальную установку зеркала в заданное положение, но не позволяет контролировать его смещение с высокой точностью. Главная структура ДОЭ, являющаяся корректором волнового фронта, предназначена для контроля формы асферической поверхности [10] интерференционным методом. При этом взаимное положение ДОЭ и контролируемой поверхности в пространстве должно быть выдержано с погрешностью в единицы и даже доли микрона. В противном случае интерферометр будет регистрировать конечное число полос. Этот же принцип можно распространить и на метод юстировки: если поверхность выставлена правильно, то на интерферограмме наблюдается поле равномерной освещённости («бесконечная» полоса). При смещении поверхности возникает интерферограмма с конечным числом полос. Перемещая в пространстве контролируемую поверхность так, чтобы минимизировать количество полос на интерферограмме, можно установить её в правильное (расчётное) положение с погрешностью в доли микрона. Данный подход может быть реализован при юстировке многокомпонентной оптической системы [11] с применением многозонального ДОЭ, каждая зона которого используется для «привязки» к соответствующей поверхности. При этом часто возникает проблема: зоны перекрывают друг друга, что ведёт к ограничению числа оптических элементов, которые могут быть выставлены с помощью одного ДОЭ. Одним из путей её решения является разбиение сложной оптической системы на блоки, к каждому из которых для юстировки рассчитывается и изготавливается соответствующий ДОЭ. Далее может быть изготовлен ДОЭ, обеспечивающий взаимную юстировку всех блоков оптической системы.

В предлагаемой работе описываются особенности расчёта многозонального ДОЭ, предназначенного для интерферометрического контроля юстировки одного из блоков сложной оптической системы, состоящего из эксцентрично расположенного сегмента асферической линзы и двух сферических. Показано, что при контроле многолинзовой системы может возникать неоднозначность. Представлены экспериментальные результаты.

Особенности расчёта многозонального ДОЭ. Для того чтобы отъюстировать с помощью ДОЭ несколько оптических компонентов относительно друг друга, на оптической подложке изготавливаются дифракционные зоны, каждая из которых используется для «привязки» к соответствующей юстируемой поверхности. Однако при расчёте таких зон имеется ряд ограничений. Если структура ДОЭ привязана к сферической поверхности юстируемой линзы, это может привести к её неправильной установке, поскольку минимум интерференционных полос может возникнуть и при наклонённой линзе со скомпенсированным боковым смещением. Поэтому при расчёте системы линз со сферическими

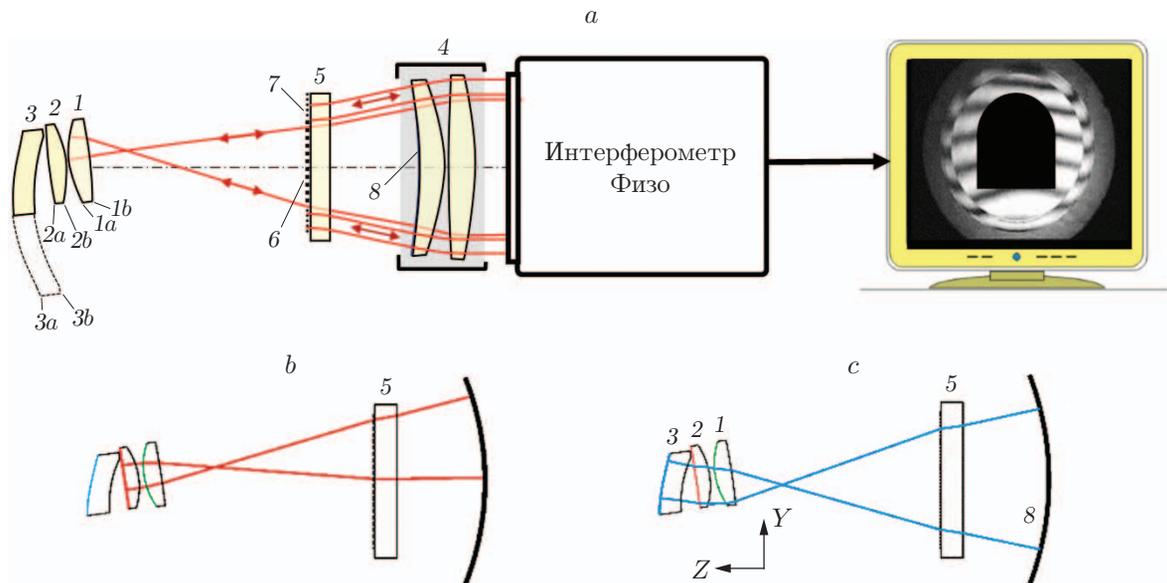


Рис. 1. Схемы хода световых лучей при контроле юстировки трёхлинзовой оптической системы: для линзы 1 (а), линзы 2 (b) и линзы 3 (c)

поверхностями необходимо рассчитывать ДООЭ так, чтобы измерительный пучок от интерферометра проходил сквозь линзу и отражался от её задней поверхности. В этом случае, измерительный пучок не будет сферическим, что позволит установить линзу однозначно.

В качестве примера в данной работе рассмотрен контроль трёхлинзового блока нецентрированной девятикомпонентной оптической системы авиационного наשלемного широкоугольного дисплейного коллиматора [12]. Блок состоит из двух сферических линз 1, 2 и одного эксцентрично расположенного сегмента асферической линзы 3 (рис. 1), примерные параметры схемы приведены в табл. 1.

Настройка линзового блока контролировалась с помощью интерферометра Физо. На рис. 1, а показан ход световых лучей при контроле положения линзы 1. На выходе интерферометра установлены эталонный объектив 4 и многозональный ДООЭ 5. Линзовый блок расположен под углом к оптической оси интерферометра. Оптический элемент состоит из основной 6 и вспомогательной 7 зон. Основная зона включает с себя три дифракционные структуры (рис. 2, а) для юстировки каждой линзы. Вспомогательная кольцевая зона, отражающая свет назад, служит для установки ДООЭ относительно интерферометра. Ход лучей после прохождения ДООЭ рассчитывается таким образом, чтобы они падали на задние поверхности линз 1а, 2а и 3а по нормали. При правильной установке линз обеспечивается

Таблица 1

Параметры трёхлинзового блока

Поверхность	Радиус R , мм	Коническая константа	Толщина, мм	Стекло	Смещение по оси Y , мм
1b	307	—	6	СТК18	—
1a	30	—	2	—	—
2b	30	—	5	К8	—
2a	946	—	7	—	—
3b	43	—	8	К8	15
3a	25	-6,5	—	—	—

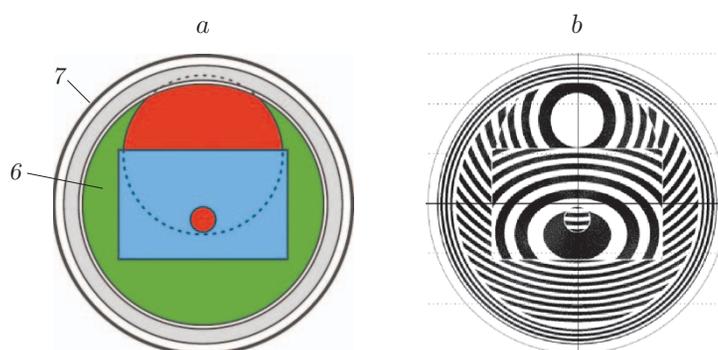


Рис. 2. Схемы ДОЭ: расположение дифракционных структур (а), их вид в 300-м порядке дифракции (b)

автоколлимационный ход лучей и интерферометр будет регистрировать «бесконечную» полосу при интерференции света, отражённого от поверхностей $1a$, $2a$ и $3a$ и от опорной поверхности 8 эталонного объектива. На рис. 1, b , c схематично показан ход световых лучей для юстировки линз 2 и 3.

Форма дифракционных структур выбрана таким образом, чтобы можно было обеспечить полную засветку контролируемой поверхности линзы. При этом дифракционные структуры перекрывали друг друга. Так как дифракционные структуры нельзя изготовить одну поверх другой, одна из структур обрезалась. Выбран компромиссный вариант: структура для контроля поверхности $3a$ была выполнена полностью, поскольку эта поверхность асферическая и самая дальняя, а потому наиболее важная для юстировки; структура для контроля поверхности $2a$ оказалась урезана наполовину, чтобы это немного скомпенсировать, был добавлен участок структуры в виде маленького круга в центре прямоугольной структуры (см. рис. 2, a). На рис. 2, b показан расчётный вид дифракционных структур в 300-м порядке дифракции.

Анализ погрешностей юстировки. На практике получить на интерферограмме менее одной интерференционной полосы достаточно сложно. Поэтому для оценки точности юстировки оптической системы были рассчитаны смещения линзы, приводящие к появлению одной интерференционной полосы (табл. 2). Смещения задавались относительно центра кривизны линзы при условии, что остальные две линзы блока установлены правильно. Из таблицы видно, что точность установки линзы уменьшается при увеличении кривизны участка поверхности, который засвечен измерительным пучком. Неправильная установка линзы 1 влечёт за собой ошибку в установке линз 2 и 3. Поэтому может возникнуть ситуация, когда неправильную установку линзы 1 можно скомпенсировать неправильной установкой линз 2 и 3. Следовательно, возникает неоднозначность в юстировке системы, т. е. возможны варианты настройки, при которых на каждой из интерферограмм будет по одной полосе.

Для примера рассмотрим смещение линз только по оси Y , в этом случае возможны четыре комбинации положения линз, которые приведены в табл. 3. В нижнем ряду табли-

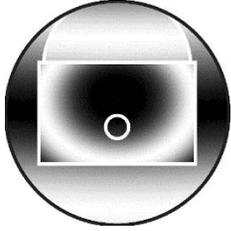
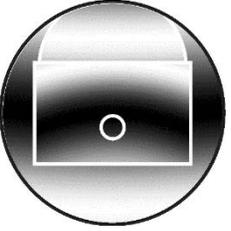
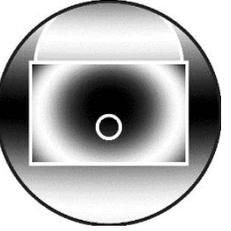
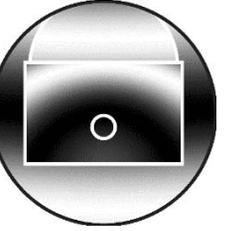
Таблица 2

Смещения линз, приводящие к появлению одной полосы на интерферограмме

Линза	Смещение по оси Z , мкм	Смещение по оси X , мкм	Смещение по оси Y , мкм	Наклон по оси X , угл. с	Наклон по оси Y , угл. с
1	1,75	0,45	0,45	6,5	5,8
2	0,95	1,45	1,5	6	4,9
3	44	1,07	8	7,2	7,4

Таблица 3

Варианты смещения линз по оси Y и вид их интерферограмм

Номер линзы	Смещение по оси Y , мкм			
	комбинация 1	комбинация 2	комбинация 3	комбинация 4
1	0,45	0,45	0,45	0,45
2	-2,1	-2,1	0,9	0,9
3	-10,7	4,1	-1,5	9,8
				

цы приведены синтезированные интерферограммы, рассчитанные при соответствующей комбинации смещений линз. Из таблицы видно, что разница между интерферограммами незначительна. На практике из-за влияния шумов и вибраций определить отличие будет сложно. При смещении линзы 1 возникают интерференционные картины на участках, соответствующих линзам 2 и 3. При настройке второй линзы можно ошибиться в направлении её смещения и скомпенсировать эту интерференционную картину, что соответствует комбинациям 1 и 2.

В табл. 4 приведён полный размах погрешности волнового фронта при прохождении световой волны ($\lambda = 0,52$ мкм) трёхлинзового блока, собранного с ошибками, указанными в табл. 3.

Из табл. 4 видно, что максимальная погрешность волнового фронта возникает при смещении асферической линзы (комбинации 1 и 4). Проведённый анализ показал, что при юстировке блока, состоящего из нескольких линз, существует ряд положений, которым соответствует одна и та же величина погрешности. Поэтому для точной юстировки необходимо обязательно настраивать систему последовательно, начиная с линзы 1.

Очевидно, что с увеличением количества линз в блоке уменьшается точность настройки системы. Решением этой проблемы может быть разделение системы на более мелкие блоки. Другое решение — контроль системы с разных концов с помощью двух ДОЭ.

Расчёт и изготовление ДОЭ. Оптическая система (см. рис. 1) моделировалась в программе Zemax [13]. Фазовая структура ДОЭ рассчитывалась с использованием программы MATLAB [14] для длины волны интерферометра 632,8 нм. Оптическая разность хода, компенсируемая ДОЭ, вычислялась методом трассировки лучей в программе Zemax с помощью DDE-протокола. Неудобство этого метода заключалось в требовании для каждой дифракционной структуры создавать отдельный Zemax-файл. Затем фазовая карта

Таблица 4

Погрешность волнового фронта, вызванная смещением линз по оси Y

Погрешность (PV)	Комбинация 1	Комбинация 2	Комбинация 3	Комбинация 4
Полная	0,18 λ	0,4 λ	0,47 λ	0,27 λ
С вычтенным наклоном	0,15 λ	0,05 λ	0,02 λ	0,14 λ

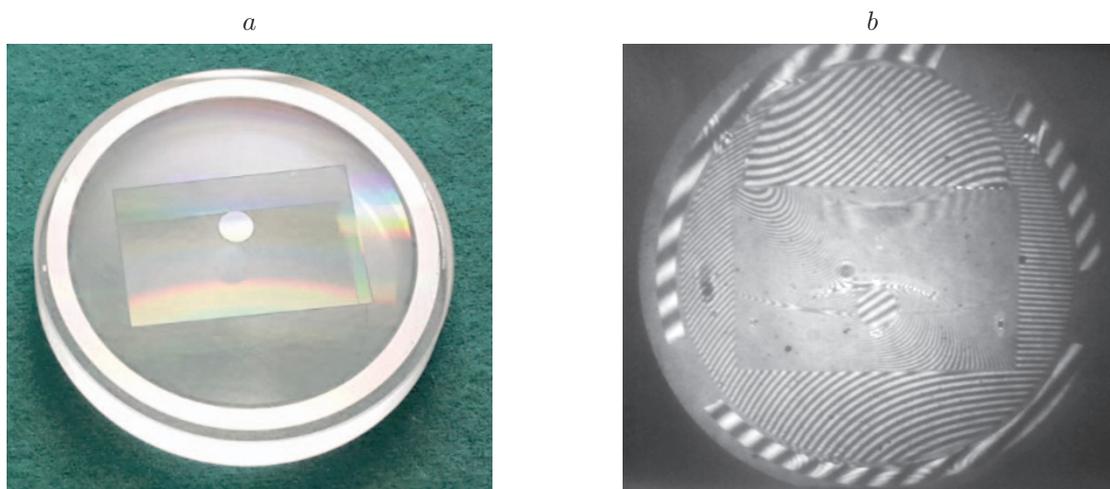


Рис. 3. Изготовленный ДОЭ: фотография ДОЭ (а), полученная интерферограмма трёхлинзового блока (b)

линейно интерполировалась и на её основе вычислялись границы дифракционных зон. Рассчитанная дифракционная микроструктура ДОЭ изготавливалась на полированной плоскопараллельной подложке из плавленного кварца диаметром 60 мм и толщиной 7,5 мм. Плоскостность сторон составляла около $0,05\lambda$ (PV). Изготовление ДОЭ проводилось в два этапа. На первом этапе осуществлялась запись микроструктуры ДОЭ в плёнке хрома по лазерной термохимической технологии с использованием разработанной в Институте автоматики и электротехники СО РАН установки CLWS-300IAE [15]. На втором этапе с помощью реактивного ионного травления формировалась бинарная фазовая микроструктура ДОЭ. Внешний вид ДОЭ показан на рис. 3, а.

Технологическим ограничением для дифракционной структуры является минимально возможный период (3 мкм) для внеосевых бинарных фазовых структур, что лимитирует максимальный угол дифракции (12°).

Контроль сборки трёхлинзового блока проводился в соответствии со схемой на рис. 1 с использованием интерферометра ИКД-110 [16] и эталонного объектива F/1.5. На рис. 3, b приведена интерферограмма трёхлинзового блока на этапе юстировки. Видно, что сферические линзы выставлены с высокой точностью. Внеосевой сегмент асферической линзы установлен с меньшей точностью, однако интерференция наблюдается. Это соответствует смещению в пределах нескольких сотен микрон либо наклону линзы в пределах десятых долей градуса.

Заключение. В данной работе предложен, смоделирован и экспериментально апробирован интерферометрический метод юстировки многокомпонентных оптических систем на основе многозональных ДОЭ. Показано, что этот метод даёт возможность установить оптические компоненты, в том числе эксцентрично расположенную асферическую линзу, с погрешностью в единицы микрон. Метод является бесконтактным и позволяет контролировать положение линзы внутри корпуса прибора. Ограничением данного метода является количество юстируемых компонентов (от трёх до четырёх) с помощью одного ДОЭ, а также максимальный угол дифракции ($12\text{--}15^\circ$), который обусловлен технологией изготовления фазового рельефа ДОЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zehnder R., Burge J. H., Zhao C. Use of computer generated holograms for alignment of complex null correctors // Proc. SPIE. 2006. **6273**. 62732S.

2. **Tesa Micro-Hite 3d СММ** — Product specifications. URL: <http://www.microhite3dcmm.com> (дата обращения: 26.05.2017).
3. **Белоглазов А. А., Орнис А. Н.** Коллимационные и автоколлимационные устройства для контроля центрирования линз // ОМП. 1972. № 10. С. 57–62.
4. **Полещук А. Г.** Совмещение дифракционных и рефракционных компонентов в оптических системах // Автометрия. 1985. № 6. С. 27–31.
5. **Coyle L. E., Dubin M. B., Burge J. H.** Design and analysis of an alignment procedure using computer-generated holograms // Opt. Eng. 2013. **52**, N 8. 084104.
6. **Burge J. H., Zehnder R., Zhao C.** Optical alignment with computer generated holograms // Proc. SPIE. 2007. **6676**. 66760C.
7. **Asfour J.-M., Poleshchuk A. G.** Asphere testing with a Fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram // JOSA A. 2006. **23**, N 1. P. 172–178.
8. **Шиманский Р. В., Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В.** Динамическая коррекция позиционирования лазерного пучка при записи крупногабаритных дифракционных элементов для контроля асферических зеркал // Автометрия. 2017. **53**, № 3. С. 64–73.
9. **Шиманский Р. В., Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В.** Совмещение записывающего пучка с осью вращения дифракционной структуры при синтезе дифракционных оптических элементов в полярной системе координат // Автометрия 2017. **53**, № 2. С. 30–38.
10. **Wyant J. C., Bennett V. P.** Using computer generated holograms to test aspheric wave fronts // Appl. Opt. 1972. **11**, N 12. P. 2833–2839.
11. **Дорошина Ю. П., Насыров Р. К., Одинокоев С. Б. и др.** Перспективы применения голограммных элементов для юстировки внеосевых оптических систем // Контенант. 2016. **15**, № 3. С. 28–33.
12. **Пат. 2586097 РФ.** Нашлемная широкоугольная коллиматорная дисплейная оптическая система /М. В. Воронова, А. М. Савицкий, М. Н. Сокольский и др. Опубл. 10.06.2016; Бюл. № 16.
13. **Zemax.** URL: <http://www.zemax.com> (дата обращения: 26.05.2017).
14. **MATLAB.** URL: <http://www.mathworks.com/products/matlab> (дата обращения: 26.05.2017).
15. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. **38**, N 8. P. 1295–1301.
16. **Трегуб В. П., Агурок И. П., Горелик М. С. и др.** Универсальный интерферометр ИКД-110 // ОМП. 1990. № 1. С. 61–63.

Поступила в редакцию 26 мая 2017 г.