

На правах рукописи



Семёнов Андрей Александрович

Разработка и исследование способов и устройств для сборки и юстировки оптических систем с асферическими поверхностями

Специальность 2.2.6. – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в АО «Научно-исследовательском институте оптико-электронного приборостроения».

Научный руководи- **Стариков Анатолий Демьянович**
тель доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппо- **Коротаев Валерий Викторович**
ненты доктор технических наук, профессор, Университет
ИТМО, профессор института «Высшая инженерно-тех-
ническая школа», г. Санкт-Петербург

Леонов Михаил Борисович
кандидат технических наук, Филиал АО «Корпорация
«Комета», старший научный сотрудник, г. Санкт-Пе-
тербург

Ведущее предприя- АО «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыт-
тие карино, Московская область

Защита состоится «26» июня 2023 г. в 13 00 на заседании совета по за-
щите докторских и кандидатских диссертаций 24.2.387.04 ФГАОУ ВО
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по адресу: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора
Попова, д. 5, литера Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка
кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах докторских и канди-
датских диссертаций».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, про-
сим направлять по адресу: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора
Попова, д. 5, литера Ф.

Автореферат разослан «25» апреля 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.387.04

кандидат технических наук, доцент



К.К. Гук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Развитие оптико-электронных систем, все более широкое их использование в различных областях народного хозяйства, науки и техники неразрывно связано с развитием и совершенствованием оптических технологий. Важным этапом развития оптических технологий является начало использования асферических поверхностей при создании оптических систем. Предложения по их использованию в оптических системах звучали еще с XVII века от Декарта, Ньютона, Кассегрена и Грегори. В XVII веке так же предпринимались первые попытки изготовления асферической оптики. Но технологические возможности по стабильному созданию качественных асферических поверхностей появились только в первой половине XX века. До этого времени считалось, что создание асферической поверхности – это искусство, а не отработанная технология. Кроме того, до конца XX века разработка сложных оптических систем, имеющих в наличии асферические поверхности, было задачей крайне трудной. Лишь только с началом массового использования ЭВМ и развития пакета прикладных программ, позволяющих осуществлять расчет оптических систем, асферическая оптика стала приобретать более широкое применение.

На сегодняшний день прогресс в области проектирования оптических систем направлен на улучшение качества изображения, увеличение поля зрения, светосилы и пропускания оптических систем, уменьшение масса-габаритных характеристик и количества оптических элементов.

Все перечисленные усовершенствования могут быть достигнуты использованием асферических поверхностей в осесимметричных оптических системах.

Но для эффективного использования асферических поверхностей в оптических системах, например, использующихся в аппаратуре дистанционного зондирования Земли, требуется решение множества расчетных, конструктор-

ских и технологических задач: разработка и расчет оптических систем с асферическими поверхностями, разработка технологий формообразования и контроля формы асферических поверхностей, разработка конструкции объективов с асферическими поверхностями и разработка способов сборки и юстировки оптических систем с асферическими поверхностями.

Теоретическая база и современные пакеты программ обеспечивают широкий спектр возможностей по расчету оптических систем, в том числе оптических систем с несколькими асферическими поверхностями. Формообразование и контроль формы асферических поверхностей также имеет широкий спектр возможностей. Однако задачи по разработке конструкции, способов сборки и юстировки оптических систем, особенно крупногабаритных, например, телескопов и высокоапертурных, например, оптических систем аэрокосмического базирования, на сегодняшний день являются менее освещенными. Кроме того, постоянное совершенствование таких систем требует развитие способов, позволяющих обеспечивать их сборку.

Указанные обстоятельства, сложность проведения операций сборки и юстировки определяют актуальность разработки и исследования способов и устройств для сборки и юстировки центрированных оптических систем с асферическими поверхностями.

Цель работы

Целью работы является разработка и исследование способов и средств, позволяющих обеспечить сборку и юстировку крупногабаритных и высокоапертурных оптических систем, в которых используются оптические элементы с асферическими поверхностями.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

Задачи диссертационной работы

1. Анализ характеристик, преимуществ и недостатков существующих способов центрировки оптических элементов с асферическими поверхностями, способов сборки и юстировки оптических систем, в состав которых входят оптические элементы с асферическими поверхностями.

2. Разработка способа центрировки крупногабаритных оптических элементов с асферическими поверхностями. Анализ погрешностей разработанного способа.

3. Разработка способа центрировки высокоапертурных асферических поверхностей оптических элементов в оправках с последующей проточкой посадочных баз оправы. Анализ погрешностей разработанного способа.

4. Анализ влияния конструктивных параметров осесимметричной двухзеркальной системы на расчетные допуски взаимной децентрировки. Исследование предельных технологических возможностей сборки и юстировки двухзеркальных объективов с асферическими поверхностями.

5. Разработка интерферометрического способа юстировки осесимметричных трехкомпонентных объективов с асферическими поверхностями.

Научная новизна работы заключается в разработке и анализе оригинальных способов сборки и юстировки сложных многокомпонентных систем:

- предложен способ центрировки асферических поверхностей в оправках, основанный на использовании системы интерферометр – голограммный компенсатор для совмещения оси асферической поверхности с осью вращения шпинделя станка, что позволило изготовить базовые поверхности на оправе оптического элемента;

- предложен способ центрировки асферических поверхностей крупногабаритных оптических элементов, основанный на использовании голограммного компенсатора в качестве промежуточной базы, что позволило установить оптическую марку соосно асферической поверхности в качестве базового элемента;

- предложен способ юстировки осесимметричных трехкомпонентных систем, основанный на анализе волнового фронта в центре и четырех точках поля зрения и использовании весовых коэффициентов, полученных в модели оптической схемы, позволяет определить и устранить децентрировки компонентов относительно главного зеркала.

Практическая значимость работы

1. Разработанный способ определения положения оси асферической поверхности в пространстве используется при установке крупногабаритного зеркала с асферической поверхностью в корпус объектива с погрешностью 75 мкм и 12", снижает трудозатраты при сборке крупногабаритных телескопов, при предварительной сборке среднегабаритных оптических систем.

2. Использование разработанного интерферометрического способа и установки для центрировки асферических поверхностей в оправках диаметром до 360 мм позволяет оптимизировать сборку и юстировку оптических систем за счет уменьшения количества юстировочных элементов в объективах насыпной конструкции, позволяет изготавливать высокоапертурные объективы, в том числе высокоразрешающий четырехзеркальный объектив с поперечными подвижками вторичного зеркала.

3. Использование полученных зависимостей расчетных и технологических допусков на децентрировку от конструктивных параметров и длин волн осесимметричных двухзеркальных объективов позволяет на начальном этапе проектирования оценить порядок величин расчетных и технологических допусков и по их соотношению определить требуемые юстировочные элементы конструкции и способ сборки.

4. Применение интерферометрического способа юстировки осесимметричных трехкомпонентных оптических систем позволяет по критериям качества изображения в виде абберационных коэффициентов комы в центре поля зрения, астигматизма и дефокусировки в 4 симметричных точках поля зрения

и по смещению автоколлимационного изображения вычислить децентрировки второго зеркала и третьего компонентов относительно оси главного зеркала.

Методология и методы исследований

Для решения поставленных задач в диссертационной работе использовались методы расчета и компьютерного моделирования с применением программ автоматического расчета (Microsoft Excel) и специализированных пакетов программных комплексов для расчета оптических систем (Zemax), методы экспериментального определения формы волнового фронта, прошедшего или отраженного от контролируемых изделий, с применением специализированных программ определения волновых aberrаций (WinFringe, DiOpto, μ Shape Professional). Практическая проверка разработанных способов осуществлена с использованием разработанных установок центрировки при создании множества оптических систем.

Научные положения

1. Установка системы интерферометр – голограммный компенсатор и асферической поверхности соосно оси вращения шпинделя токарного станка и проточка цилиндрической образующей и посадочной плоскости оправы оптического элемента позволяет совместить ось асферической поверхности и опорных баз оправы с погрешностью до 3 мкм и 3'' и минимизировать количество юстировочных элементов в объективах насыпной конструкции;

2. Анализ волнового фронта, отраженного от асферической поверхности, и использование кольцевой структуры голограммного компенсатора в качестве промежуточной базы для установки визирной трубы соосно асферической поверхности позволяет установить оптическую марку соосно асферической поверхности с погрешностью до 40 мкм и 6'' и использовать ее в качестве базового элемента при сборке крупногабаритных систем;

3. Определение и устранение децентрировок вторичного зеркала и третьего компонента трехкомпонентных объективов по результатам анализа состава aberrационных коэффициентов волнового фронта в центре и в четырех

симметричных точках поля зрения позволяет минимизировать aberrации волнового фронта объектива по всему полю зрения.

Разработанные способы могут быть рекомендованы для использования при изготовлении оптических систем с асферическими поверхностями для комплексов дистанционного зондирования поверхности Земли.

Внедрение результатов работы

Способ определения положения оси асферической поверхности в пространстве (Патент России №2658106. 2018 г.) используется при установке крупногабаритного главного зеркала в корпус крупногабаритного высокоапертурного объектива УПК «Галера» в АО «Научно-исследовательском институте оптико-электронного приборостроения».

Интерферометрический способ центрировки асферических поверхностей в оправках (Патент России №186481. 2019 г.) использовался при центрировке оптических элементов, входящих в состав объективов оптико-электронных одноканальных и двухканальных испытательных стендов, СЧ ОКР «Сokol-ИПС-Комета» каналов видимого и инфракрасного диапазонов в АО «Научно-исследовательском институте оптико-электронного приборостроения».

Установка для центрировки асферических поверхностей (патенты России № 186481 2019 г., №201539 2020 г.) используется при создании объективов оптической системы «Диксон» в АО «Научно-исследовательском институте оптико-электронного приборостроения».

Реализация научных результатов представлена в отчетах проведенных ОКР, а также в актах использования, приведенных в приложении 1. Выполненные с использованием разработанных способов установки и изделия используются в АО «Комета» и в АО «НПО «Орион».

Апробация работы

Результаты работы были представлены на конференциях: XLV научная и учебно-методическая конференция, Университет ИТМО в 2016 г.,

XII международная конференция «Прикладная оптика-2016» в 2016 г., VI Конгресс молодых ученых, Университет ИТМО в 2017 г., Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования, ЛЗОС в 2019 г.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 13 научных трудов: 4 статьи в изданиях из перечня ВАК, 2 в материалах международной и российской конференций и сборниках, в соавторстве получено 5 патентов на полезные модели и 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 1 приложения; содержит 161 страницу машинописного текста, 67 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает в себя 89 наименований. Нумерация используемых литературных источников сквозная по всему тексту. Нумерация рисунков и формул выполнена по главам.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научной задачи, решаемой в диссертационной работе, определена цель и поставлены задачи, изложена научная новизна, практическая ценность результатов работы, приведены выносимые на защиту положения, представлены сведения о апробации результатов работы.

В первой главе диссертационной работы на основании обзора литературных источников произведен анализ контактных, автоколлимационных, интерференционных способов определения децентрировки, центрировки и юстировки асферических поверхностей. Выполненный анализ позволил определить параметры оптических элементов и устройств измерения, влияющие на погрешность способов.

При проведении обзора выделена имеющая высокую перспективу группа способов, в которой в качестве базового элемента используется голо-

граммный компенсатор, относительно которого выполняется установка оптического элемента с асферической поверхностью. Эта группа способов, особенно при работе с высокоапертурными системами, позволяет с высокой точностью определять в пространстве положение оси асферической поверхности.

По результатам обзора и анализа сделан вывод, что для достижения наилучшего результата при сборке необходимо комбинировать способы центрировки и юстировки. При этом перспективной является разработка способа, позволяющего производить центрировку асферических поверхностей вне корпуса объектива и не требующего от его конструкции большого количества юстировочных подвижек.

Во второй главе диссертационной работы представлены два разработанных способа центрировки асферических поверхностей, произведено аналитическое сравнение данных способов с известными способами, рассмотренными в главе 1, и выполнен анализ погрешностей.

Для сборки крупногабаритных оптических систем разработан способ центрировки асферических поверхностей, позволяющий определить и обозначить ось в пространстве. Данный способ с использованием изготовленного для контроля формы асферической поверхности голограммного компенсатора, установленной вблизи вершины асферической поверхности оптической марки, интерферометра и визирной трубы позволяет определить децентрировку оптической марки относительно оси асферической поверхности или установить оптическую марку соосно асферической поверхности (рисунок 1).

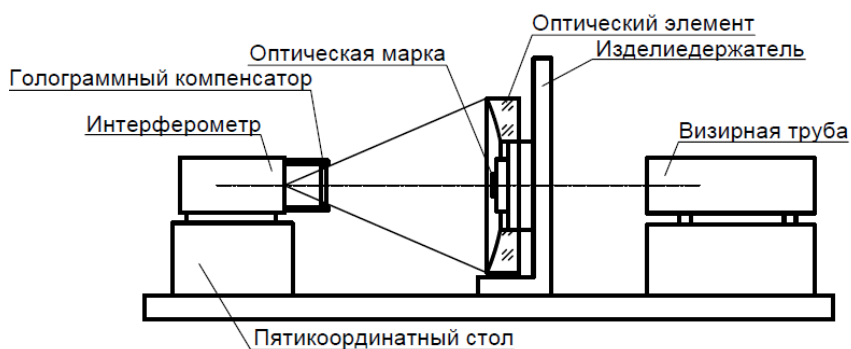


Рисунок 1. Схема определения положения оси асферической поверхности и установки оптической марки на ее ось

Введение оптической марки позволяет выполнять центрировку асферической поверхности по угловой и линейной координатам и ориентироваться при установке асферической поверхности на соосный ей базовый элемент, что существенно упрощает сборку крупногабаритных систем и систем с большими межкомпонентными промежутками, особенно, когда оптические марки установлены на нескольких оптических элементах.

Второй разработанный интерферометрический способ центрировки асферических поверхностей в оправе (рисунок 2) позволяет минимизировать количество юстировочных подвижек в объективах насыпной конструкции. Предложенный способ с использованием прецизионного токарного станка, центрировочного патрона, изготовленного для контроля формообразования асферической поверхности голограммного компенсатора, интерферометра, датчиков линейных и угловых перемещений обеспечивает совмещение оси асферической поверхности с осью вращения шпинделя станка, позволяет проточить посадочные базы оправы соосно асферической поверхности.

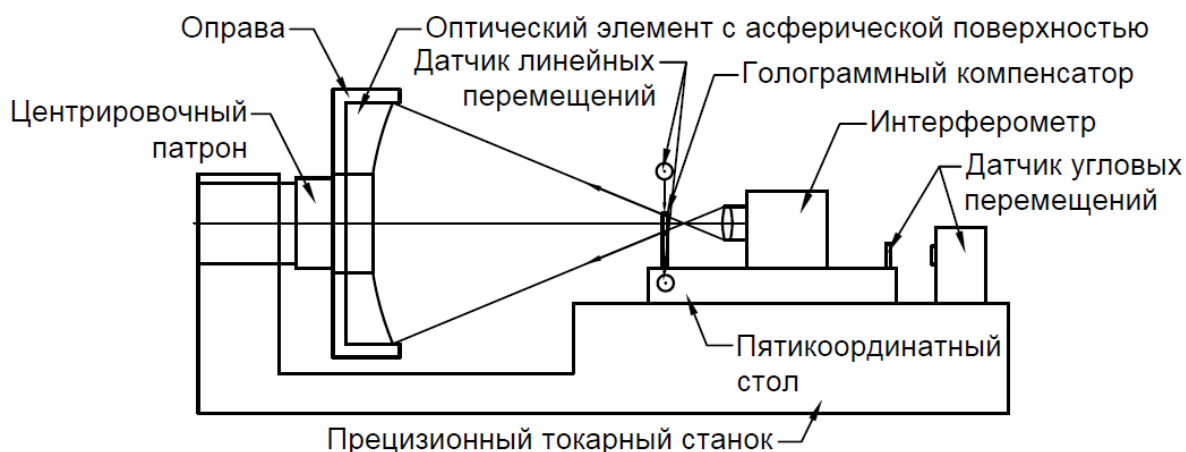


Рисунок 2. Схема интерферометрического способа центрировки асферической поверхности в оправе

Полученные после центрировки опорные базы оправы позволяют при установке оптического элемента в оправе в корпус насыпной конструкции с минимальными зазорами между корпусом и оправой обеспечивать высокую соосность асферической поверхности и корпуса объектива.

Приведены основные составляющие погрешности центрировки, установлены характеры влияния светового диаметра, величины асферизации, диафрагменного числа и центрального экранирования асферической поверхности на погрешность центрировки предложенными способами.

В третьей главе диссертационной работы определены зависимости расчетных допусков на децентрировку от конструктивных параметров, выполнен анализ технологических возможностей сборки двухзеркальных объективов, выполненных по схеме Ричи-Кретьена, и предложен способ юстировки трехкомпонентной оптической системы.

Определен характер влияния относительного межзеркального расстояния, центрального экранирования на расчетные допуски на взаимную децентрировку асферических поверхностей двухзеркальной сборки. Кроме того, в качестве примера использования полученных зависимостей технологических погрешностей сборки и зависимостей допусков от конструктивных параметров рассмотрены варианты создания двухзеркального объектива, выполненного по схеме Ричи-Кретьена, с различными исходными конструктивными параметрами.

При рассмотрении и анализе технологических возможностей сборки двухзеркальных объективов были рассмотрены способы сборки с использованием координатно-измерительной машины (КИМ), с использованием разработанного способа центрировки с оптической маркой, с использованием разработанного способа центрировки оптических элементов с асферическими поверхностями в оправках, способы юстировки с использованием общего голограммного компенсатора и по симметрии абберационных коэффициентов.

Результаты сопоставления технологических допусков рассмотренных способов сборки и юстировки с расчетными допусками на взаимную децентрировку асферических зеркал, применимость, достоинства и ограничения рассмотренных способов приведены в таблице 1.

Таблица 1

№	Способ сборки и юстировки	Применение	Достоинства, ограничения
1	Способ сборки с использованием КИМ	В дальнем ИК диапазоне. В среднем ИК диапазоне. В видимом диапазоне при $K > 7$ В видимом диапазоне для предварительной сборки	Достаточно высокая точность. Световой диаметр и фокусное расстояние ограничены параметрами КИМ. Конструкция должна обеспечивать доступ датчика КИМ к базовым поверхностям зеркал. Повышенные требования к точности изготовления базовых поверхностей. Требуется доводка в видимом диапазоне при $K \leq 7$ для исключения линейной и угловой децентрировки.
2	Способ сборки с предварительной центровкой зеркал в оправках	В дальнем ИК диапазоне. В среднем ИК диапазоне при $K \geq 5$ В видимом диапазоне для предварительной сборки	Достаточно высокая точность. Световой диаметр ограничен параметрами центрировочного станка. Требуется доводка в видимом диапазоне для исключения линейной децентрировки. Минимальное количество юстировочных приспособлений в объективах насыпной конструкции.
3	Способ сборки с переносом осей асферических поверхностей на оптическую марку	В дальнем ИК диапазоне при $K > 4$. В среднем ИК диапазоне при $K > 6$. В видимом диапазоне для предварительной сборки	Простота сборки крупногабаритных низкоапертурных телескопов. Минимальное количество дополнительного оборудования. Ограниченная точность. Требуется доводка в видимом диапазоне и ИК диапазоне при малых K для исключения линейной и угловой децентрировки.
4	Способ юстировки с общим голограммным компенсатором	Во всех спектральных диапазонах. При любых диафрагменных числах.	Высокая точность юстировки. Одновременная установка межзеркального расстояния. Световой диаметр вторичного зеркала ограничен диаметром голограммы. Конструкция должна обеспечивать доступ к голограммному элементу, его юстировку и демонтаж. Сложность способа из-за наличия многих юстировочных устройств.
5	Способ юстировки по симметрии аберрационных коэффициентов	Во всех спектральных диапазонах. При любых диафрагменных числах и световых диаметрах.	Высокая точность юстировки. Минимум дополнительного оборудования. Хорошо работает для объективов с качеством изображения, близким к дифракционному пределу.

Разработан интерферометрический способ для сборки и юстировки трехкомпонентной схемы (двухзеркальной схемы с линзовым или зеркальным

компенсатором), основанный на анализе aberrации комы третьего порядка в центре поля, положении фокальной точки и симметрии aberrационных коэффициентов астигматизма и дефокусировки в симметричных точках поля.

$$A_{\omega+} - A_{\omega-} = Q\Delta_2 + W\delta_2 + E\Delta_3 + R\delta_3$$

$$C_{\omega 0} = T\Delta_2 + Y\delta_2 + U\Delta_3 + I\delta_3$$

$$D_{\omega+} - D_{\omega-} = O\Delta_2 + P\delta_2 + G\Delta_3 + H\delta_3$$

$$L = J\Delta_2 + K\delta_2 + Z\Delta_3 + X\delta_3 ,$$

где Δ_2 – линейная децентрировка вторичного зеркала, мкм; δ_2 – наклон вторичного зеркала, угл. сек.; Δ_3 – линейная децентрировка третьего компонента, мкм; δ_3 – наклон третьего компонента, угл. сек.; $A_{\omega+}$, $A_{\omega-}$ – значения aberrационных коэффициентов астигматизма в симметричных точках поля; $C_{\omega 0}$ – значение aberrационного коэффициента комы в центре поля зрения; $D_{\omega+}$, $D_{\omega-}$ – значения aberrационных коэффициентов дефокусировки в симметричных точках поля; L – смещение фокальной точки объектива интерферометра относительно оси главного зеркала, мм. Остальные переменные – весовые коэффициенты, устанавливающие влияние децентрировок на определяемые параметры.

В четвертой главе диссертационной работы представлены результаты применения предложенных способов центрировки при создании нескольких штатных объективов различного назначения. Представлена разработанная установка для центрировки оптических элементов с асферическими поверхностями в оправках на базе прецизионного токарного станка.

Способ центрировки асферической поверхности с оптической маркой применяется при создании серии крупногабаритных объективов при установке главного зеркала на ось линзового блока.

С использованием фазового интерферометра Fisba μ phase ($\lambda=0,6328$ мкм), визирной трубы ППС-11 и разработанного держателя оптической марки на ось асферической поверхности установлена оптическая марка в

виде плоскопараллельной пластины с перекрестием (рисунок 3). С использованием визирной трубы ППС-11 главное зеркало установлено на ось линзового блока с погрешностью установки $\Delta=75$ мкм и $\delta=12''$ – меньше расчетных допусков на децентрировку. Произведена юстировка вторичного зеркала до минимизации асимметрии абберационных коэффициентов.

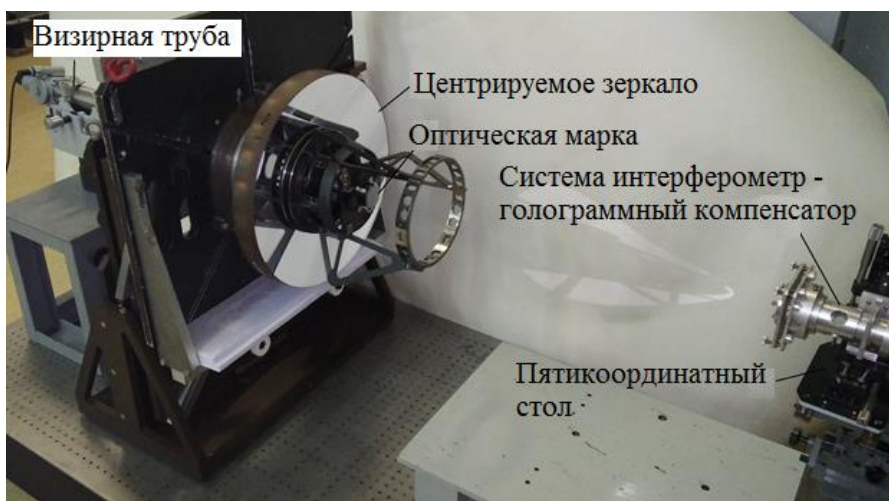


Рисунок 3. Установка оптической марки на ось главного зеркала

Разработана и реализована установка, включающая в себя три схемы центрировки асферических поверхностей: центрировка с использованием голограммного компенсатора и интерферометра (рисунок 4), центрировка с использованием автоколлимационной системы контроля aberrаций на базе датчика Шека-Гартмана, центрировка с использованием автоколлимационного микроскопа и лазерного датчика линейных перемещений.

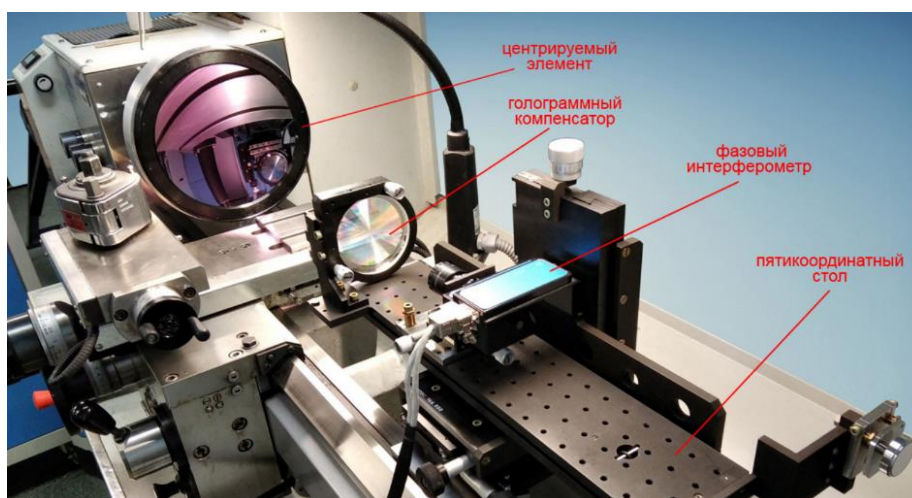


Рисунок 4. Установка для центрировки асферических поверхностей в оправе с использованием интерферометра и голограммного компенсатора

Изображения топограмм центрированной асферической поверхности до и после разворота шпинделя станка на 180° приведены на рисунке 5.

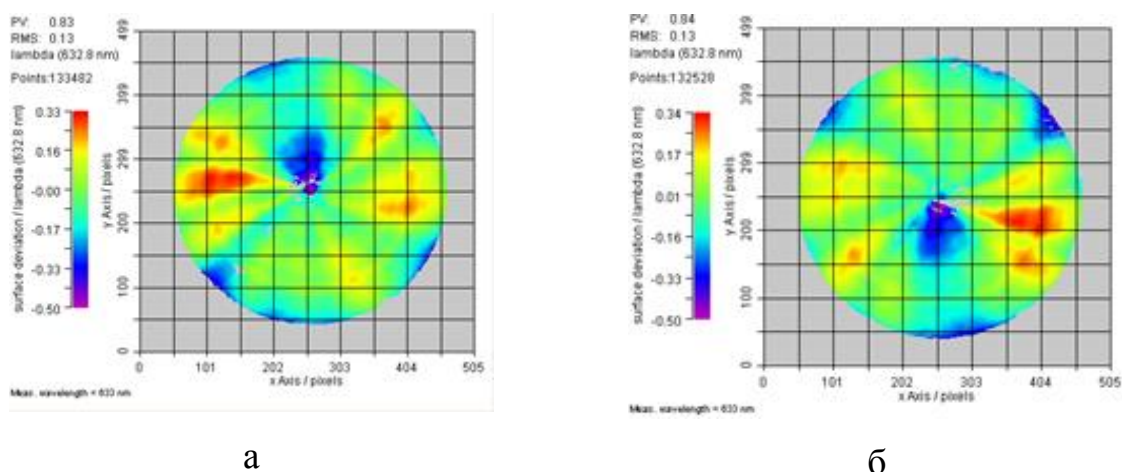


Рисунок 5. Изображения топограмм центрированной асферической поверхности до разворота шпинделя станка (а) и после разворота (б)

Интерферометрический способ и установка для центровки асферических поверхностей в оправках применен при изготовлении высокоапертурного четырехзеркального объектива. С использованием фазового интерферометра Fisba μ phase ($\lambda=0,6328$ мкм), разработанного пятикоординатного стола, прецизионного токарного станка LZ360S, двух цифровых индикаторов Mitutoyo и автоколлиматора АК-0,5М выполнена центровка четырех зеркал, в том числе с относительным отверстием 1:1,1, в оправках. Погрешность центровки с последующей установкой зеркала в корпус насыпной конструкции и допуски на децентрировку приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Элемент схемы	Зеркало 1		Зеркало 2		Зеркало 3		Зеркало 4	
	Лин., мкм	Угл., "	Лин., мкм	Угл., "	Лин., мкм	Угл., "	Лин., мкм	Угл., "
Расчетный допуск	± 5	± 10	± 5	± 10	± 15	± 15	± 50	± 10
Погрешность	± 15	± 6	± 14	± 7	± 14	± 5	± 19	± 7

Центрированные зеркала в оправках были установлены в корпус насыпной конструкции. Выполнена юстировка вторичного зеркала поперечным смещением до минимизации aberrации кома в центре поля зрения. На рисунке 6 приведены интерферограммы в центре и в симметричных точках поля зрения.

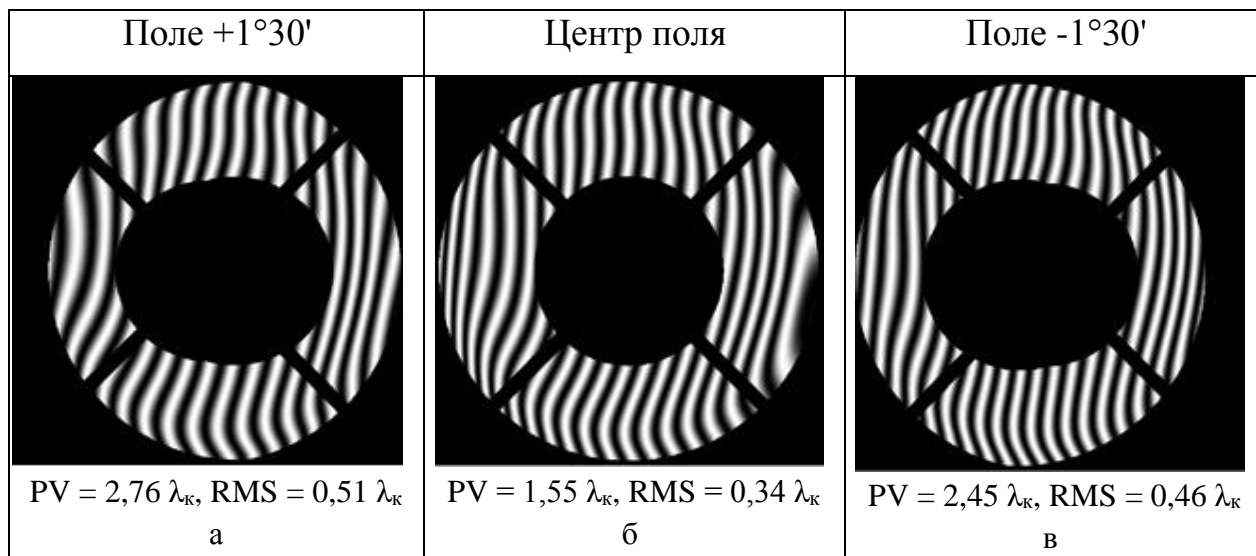


Рисунок 6. Интерферограммы и параметры волнового фронта в центре (б) и в двух симметричных точках поля зрения (а, в) после юстировки вторичного зеркала

Заключение

В диссертационной работе на основе проведенных исследований получены следующие результаты:

1) Разработан оригинальный способ центрировки асферических поверхностей, не имеющий ограничений по габаритам центрируемых элементов и предназначенный для сборки крупногабаритных объективов. (Патент России №2658106. 2018 г.). Установлен характер влияния параметров асферической поверхности на общую погрешность центрировки асферических поверхностей. Способ используется при сборке крупногабаритных зеркально-линзовых объективов для дистанционного зондирования Земли со световым диаметром 500 мм и относительным отверстием 1:2.

2) Разработан способ центрировки асферических поверхностей для изготовления на оправе базовых поверхностей соосно асферической поверхности

с высокой точностью, предназначенный для сборки объективов насыпной конструкции (Патент России №186481. 2019 г.). Установлен характер влияния параметров асферической поверхности на точность центрировки. Способ используется при сборке высокоапертурных объективов бортовой аппаратуры.

3) На основе анализа погрешностей сборки и юстировки различных способов и допусков на децентрировку осесимметричных двухзеркальных систем установлены технологические возможности и границы применимости рассмотренных способов, позволяющие на этапе проектирования определить способ сборки и заложить в конструкцию юстировочные устройства.

4) Разработан способ юстировки трёхкомпонентных объективов, основанный на анализе аберраций волнового фронта, прошедшего объектив, в нескольких точках поля зрения (Патент России №2776692. 2022 г.). Использование данного способа при юстировке трехкомпонентных оптических систем (трехзеркальной или двухзеркальной с линзовым компенсатором) позволяет минимизировать ошибки волнового фронта объектива по всему полю зрения.

5) Разработана и внедрена на опытном производстве АО «НИИ ОЭП» установка по центрировке осесимметричных оптических элементов с асферическими поверхностями любой формы и величины асферизации (Патенты России №186481. 2019 г., №201539. 2020 г.).

Полученные результаты работы в настоящее время используются для изготовления оптических систем, в состав которых входят оптические элементы с асферическими поверхностями.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Вензель В.И., Семёнов А.А., Синельников М.И. Интерференционный способ определения положения оси асферической поверхности и устройство для его осуществления// Патент России №2658106. 2018.

2. Вензель В.И., Семёнов А.А. Автоколлимационное интерферометрическое устройство для центрировки оптических элементов// Патент России №183150. 2018.

3. Вензель В.И., Семёнов А.А. Интерферометрическое устройство центрировки оптических элементов с асферическими поверхностями в оправках// Патент России № 186481. 2019.

4. Вензель В.И., Данилов М.Ф., Савельева А.А., Семёнов А.А. Применение координатно-измерительных машин для сборки и юстировки осесимметричных двухзеркальных объективов с асферическими зеркалами// Оптический журнал. 2019. Т. 86. №2. С. 68-73.

5. Вензель В.И., Семёнов А.А. Автоколлимационное устройство для центрировки оптических элементов// Патент России №2705177. 2019.

6. Вензель В.И., Данилов М.Ф., Савельева А.А., Семёнов А.А., Синельников М.И. Границы применимости методов сборки и юстировки осесимметричных двухзеркальных объективов с асферическими зеркалами // Оптический журнал. 2019. Т. 86. №4. 22-31.

7. Вензель В.И., Семёнов А.А. Устройство центрировки оптических элементов с асферическими поверхностями в оправках// Патент России №201539. 2020.

8. Вензель В.И., Муравьева Е.С., Семёнов А.А. Соломин С.О. Интерферометр с функцией дифференциальных измерений// Патент России №2744847. 2021.

9. Вензель В.И., Семёнов А.А. Юстировка зеркально-линзового объектива с эксцентрично расположенным зрачком для инфракрасной области спектра. Оптический журнал. 2021. Т.88. №5. Стр. 82-89.

10. Вензель В.И., Семёнов А.А. Интерферометрический способ юстировки трехкомпонентных объективов// Патент России №2776692. 2022.

11. Вензель В.И., Дмитриев И.Ю., Муравьева Е.С., Семёнов А.А. Технология создания светосильного четырехзеркального объектива с асферическими зеркалами// Оптический журнал. 2023. Т. 90. №1. С. 26-36.

в других изданиях

12. Вензель В.И., Данилов М.Ф., Лебедев А.О., Савельева А.А., Семёнов А.А., Синельников М.И. Возможности метода юстировки осесимметрич-

ных двухзеркальных объективов с асферическими зеркалами по геометрическим базам // Сборник трудов конференции «Прикладная оптика – 2016». – СПб. – Т.1. С.23-27.

13. Вензель В.И., Семёнов А.А. Влияние конструктивных параметров двухзеркальных объективов на допуски взаимной децентрировки зеркал // Тезисы докладов Международной конференции «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования». Лыткарино. 2019.

Подписано в печать: 24.04.2023

Объём: 1 ус.п.л

Тираж: 100 экз.

Отпечатано в типографии АО «НИИ ОЭП»
г. Сосновый Бор, Ленинградская ул., д. 29, лит. Т