

Методика сборки и юстировки зеркально-линзовых объективов с эксцентрично расположенным полем изображения

© В.И. Заварзин, А.В. Ли, С.А. Морозов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

На конкретном примере рассмотрена методика юстировки нового перспективно-го зеркально-линзового объектива с эксцентрично расположенным полем изображения. Предложено использовать интерференционные методы контроля.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, юстировка, зеркально-линзовые объективы, эксцентрично расположенное поле изображения.

Введение. В настоящее время отмечается интенсивное развитие приборов для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Одно из наиболее актуальных требований к аппаратуре ДЗЗ — обеспечение мультиспектральной съемки в широкой полосе захвата, что реализуется с помощью зеркальных или зеркально-линзовых объективов с эксцентрично расположенным полем изображения. За счет использования наклонных пучков лучей в таких системах удастся избежать центрального экранирования [1–3].

Поскольку в этих системах обычно находятся асферические поверхности, причем часто только внеосевые фрагменты [4], то существуют большие сложности при сборке и юстировке.

Основные этапы сборки и юстировки. В данной работе рассматривается последовательность сборки и юстировки зеркально-линзового объектива с эксцентрично расположенным полем изображения [2]. Подобные системы имеют сложную конструкцию с линзовым компенсатором и дополнительным плоским зеркалом для более компактной компоновки объектива, оптическая схема которого представлена на рис. 1. Зеркало 1 объектива представляет собой асферическую поверхность второго порядка (гиперболоид). Зеркала 2 и 3 — сферические. Зеркало 4 — плоское компоновочное. Все силовые зеркала являются внеосевыми фрагментами осесимметричных зеркал. Использование линзового компенсатора 5 позволяет избавиться от асферических поверхностей на втором и третьем зеркалах.

Преимущество данной схемы с точки зрения удобства сборки и юстировки заключается в том, что все оптические элементы собран-

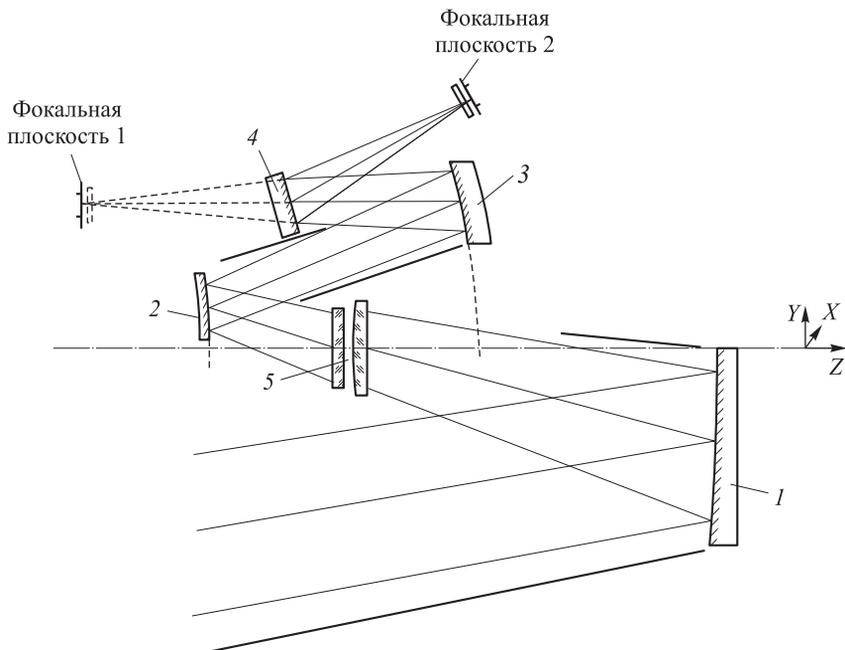


Рис. 1. Оптическая схема объектива

ного объектива имеют общую меридиональную плоскость, в которой лежит оптическая ось объектива.

Конструкция объектива позволяет производить центровку его компонентов при сборке по наблюдению автоколлимационных (АК) бликов от поверхностей оптических элементов при их освещении точечным источником света. Второе зеркало объектива предлагается изготавливать из оптического стекла, тыльная сторона которого должна быть полированной и концентричной рабочей поверхности. При установке второго зеркала осуществляется контроль вогнутой поверхности с тыльной стороны зеркала. Схема АК точек объектива представлена на рис. 2.

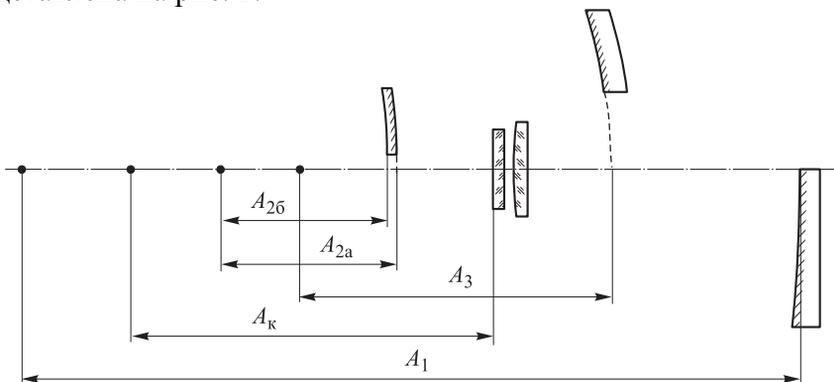


Рис. 2. Схема АК точек объектива:

A_i — расстояния от вершин соответствующих поверхностей до их АК точек

Как известно, АК точки сферической поверхности совпадают с центром ее кривизны. В рассматриваемом объективе только первая поверхность является асферической (вогнутый гиперboloид). Остальные поверхности сферические, и для них поиск АК точек сведется к нахождению положения центров их кривизны.

Для сборки и юстировки объектива понадобятся следующие измерительные приборы:

- интерферометр для контроля вогнутых оптических поверхностей;
- визирная АК труба для контроля центрировки и смещения оптических компонентов;
- автоколлимационные теодолиты для высокоточных угловых измерений.

Сравнительные характеристики измерительных приборов, которые могут быть использованы для сборки и юстировки, приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Параметр	FTI-100 PS	Zygo Verifire	4D Technology FizCam 2000
Тип интерферометра	Физо с фазовым сдвигом		
Световой диаметр, мм	102		
Увеличение, кратность	1–6	1–6	–5
Канал наводки, град	±2	±3	±3
Погрешность, СКО	0,001λ	0,00083λ	0,001λ
Формат приемника	1024×768	640×480	1000×1000
Время съема, с	0,3	0,17	0,03
Тип лазера	He:Ne	He:Ne	658 нм

Таблица 2

Параметр	ППС-031	ППС-11	Vermont Photonics alignment telescope
Диапазон фокусировки, м	0–∞		
Увеличение (обратное), кратность	0,6–58,0	0,6–58,0	0,5–77
Посадочный диаметр трубы, мм	64	64	40
Погрешность измерения, мкм	5,0–60,0	20–150	10
Автоматизация	Да	Нет	Нет

Таблица 3

Параметр	УОМЗ 3Т2КА	Leica Geosystems TM6100A
Точность:		$\sigma \leq 0,5''$
по горизонтали	$\sigma \leq 2''$	
по вертикали	$\sigma \leq 2,4''$	
Диаметр объектива, мм	48	40
Угловое поле	1° 35»	1° 08»
Увеличение, кратность	30	13 на 0,6 м 32 на 10 м, нелинейная
Минимальное расстояние измерения, м	1,5	0,6
Фокусировка	Нет	Да
Диапазон работы: вертикальные углы при двух положениях трубы	30°...145°	-55°...+47°
Отсчетное устройство	Шкалы с лимбами с оптическим совмещением	LCD сенсорный экран ¼ VGA (320×240)
Сохранение данных	–	Карта памяти CompactFlash, 256 МБ внутренней памяти
Интерфейс	–	RS232, программируемый

Последовательность сборки и юстировки объектива можно разделить на два этапа:

- сборка и выставление компонентов;
- доводка оптической системы.

Для точной юстировки изделия предлагается проводить установку и юстировку оптических элементов непосредственно в штатном корпусе с использованием методик интерферометрического контроля оптических поверхностей в АК схемах, аналогичных схемам контроля, применяемым при изготовлении деталей. Выставление и юстировка положения деталей с соблюдением требуемых линейных расстояний и угловых разворотов относительно координатных осей существенно облегчит операцию доводки качества объектива за счет сравнительно малых юстировочных перемещений компонентов.

Доводку оптической системы предполагается осуществлять по результатам сквозного контроля волнового фронта непосредственно в штатном корпусе, проводя интерферометрический контроль в АК схеме. Доводка будет сводиться в основном к устранению остаточных ошибок, обусловленных ошибками аттестации линзового компенсатора и возможными погрешностями юстировки пространствен-

ного положения оптических деталей, которые приводят к неопределенности значений воздушных промежутков между элементами.

Следует отметить, что целью этапа доводки настоящей методики является минимизация aberrаций волнового фронта всей оптической системы даже при значительных отступлениях от расчетных значений таких параметров изготовленных оптических элементов, как вершинный радиус и расстояние от оптической оси до ближнего края зеркала, и устранение ошибок юстировки изделия. При этом все остаточные ошибки формообразования поверхностей элементов могут складываться и снижать качество изображения оптической системы.

Контроль положения зеркал. Для осуществления этапа сборки и выставления компонентов объектива понадобится выставлять зеркала в их расчетные положения. При этом перед началом сборки необходимо аттестовать фактические параметры оптических деталей объектива.

В качестве точечного источника можно использовать интерферометр Физо, например FTI-100 [5] с эталонным объективом фирмы Zygo. Для контроля асферического зеркала нужно рассчитать и изготовить компенсатор (линзовый либо синтезированный голограммный) aberrаций гиперболы.

Вид интерференционной картины, получаемой в процессе контроля, представлен на рис. 3.

Записанная интерференционная картина называется интерферограммой. Для регистрации интерферограмм используется матричный приемник изображения, все интерферограммы обрабатываются и сохраняются в цифровом виде на компьютере.

Схемы контроля положения зеркал представлены на рис. 4. Контрольная схема (рис. 4, а) применяется для аттестации первого зеркала и включает контролируемое зеркало 1, интерферометр 2 и компенсатор 3 для исправления aberrаций нормали гиперболоида. Схема контроля, изображенная на рис. 4, б, используется для аттестации третьего зеркала. В ходе контроля должны быть аттестованы:

- интерферограммы и остаточные волновые aberrации зеркал;
- расстояния от вершины зеркал до АК точек A_1, A_3 (см. рис. 2);

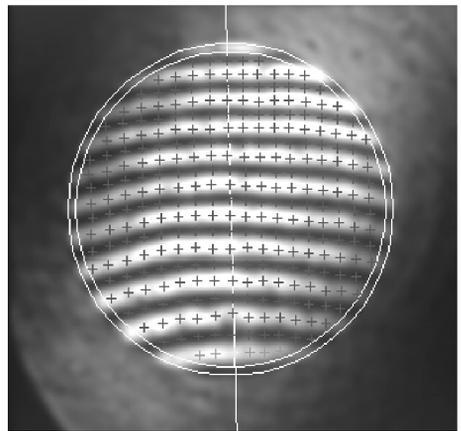


Рис. 3. Вид интерференционной картины, получаемой в процессе контроля

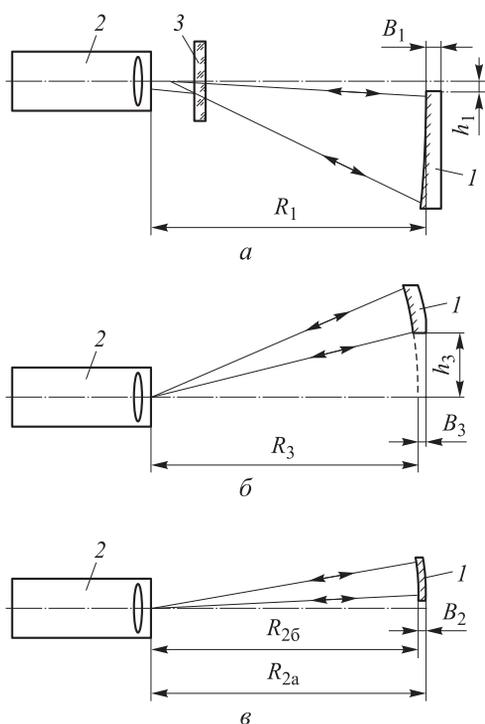


Рис. 4. Схемы контроля зеркал:
a — первого; *б* — третьего; *в* — второго

- расстояния от вершин рабочей и тыльной поверхностей зеркала до интерферометра R_{2a} , R_{2b} ;
- вершинная толщина зеркала по оптической оси B_2 .

Рассмотрим последовательность сборки и выставления компонентов.

Материализация оптической оси объектива. Логика построения технологии сборки любого оптического прибора сводится, прежде всего, к правильному выбору базовой системы координат изделия и ее реальному воплощению в оптимальном виде, доступном месте и в нужный момент сборки прибора [6].

Для материализации базовой системы координат в конструкции предусмотрена плоскость, на которую устанавливается высокоточная куб-призма в оправе с тремя ортогональными зеркальными гранями. Необходимо поместить ее на плоскости так, чтобы был обеспечен визуальный доступ к зеркальным граням базовой куб-призмы.

Согласно оптической схеме объектива, линзовый компенсатор состоит из блока осесимметричных линз со сферическими поверхностями, вершины и центры кривизны которых лежат на одной прямой (на оптической оси объектива). Поэтому за базовую ось при сборке объектива логично принять оптическую ось линзового компенсатора,

- расстояния от вершины зеркал до интерферометра R_1 , R_3 ;

- расстояния от зеркала до оптической оси h_1 , h_3 ;

- вершинные толщины зеркал l и 3 по оптической оси B_1 и B_3 , т. е. расстояние вдоль оптической оси от вершины рабочей поверхности зеркала до края тыльной стороны зеркала.

Схема контроля, изображенная на рис. 4, *в*, используется для аттестации второго зеркала. В ходе контроля должны быть аттестованы:

- интерферограмма и остаточные волновые aberrации зеркала;

- расстояния от вершин рабочей и тыльной поверхностей зеркала до их АК точек A_{2a} , A_{2b} (см. рис. 2);

а за базовую поверхность – аттестованную последнюю поверхность линзового компенсатора.

Схема рабочего места для сборки и юстировки объектива представлена на рис. 5, а. На амортизированном основании установлены направляющие 2, собираемое изделие 3 и поперечное визирное устройство 4. На направляющих 2 установлена подвижная каретка 1 с закрепленным на ней интерферометром типа ФТИ-100. Автоколли-

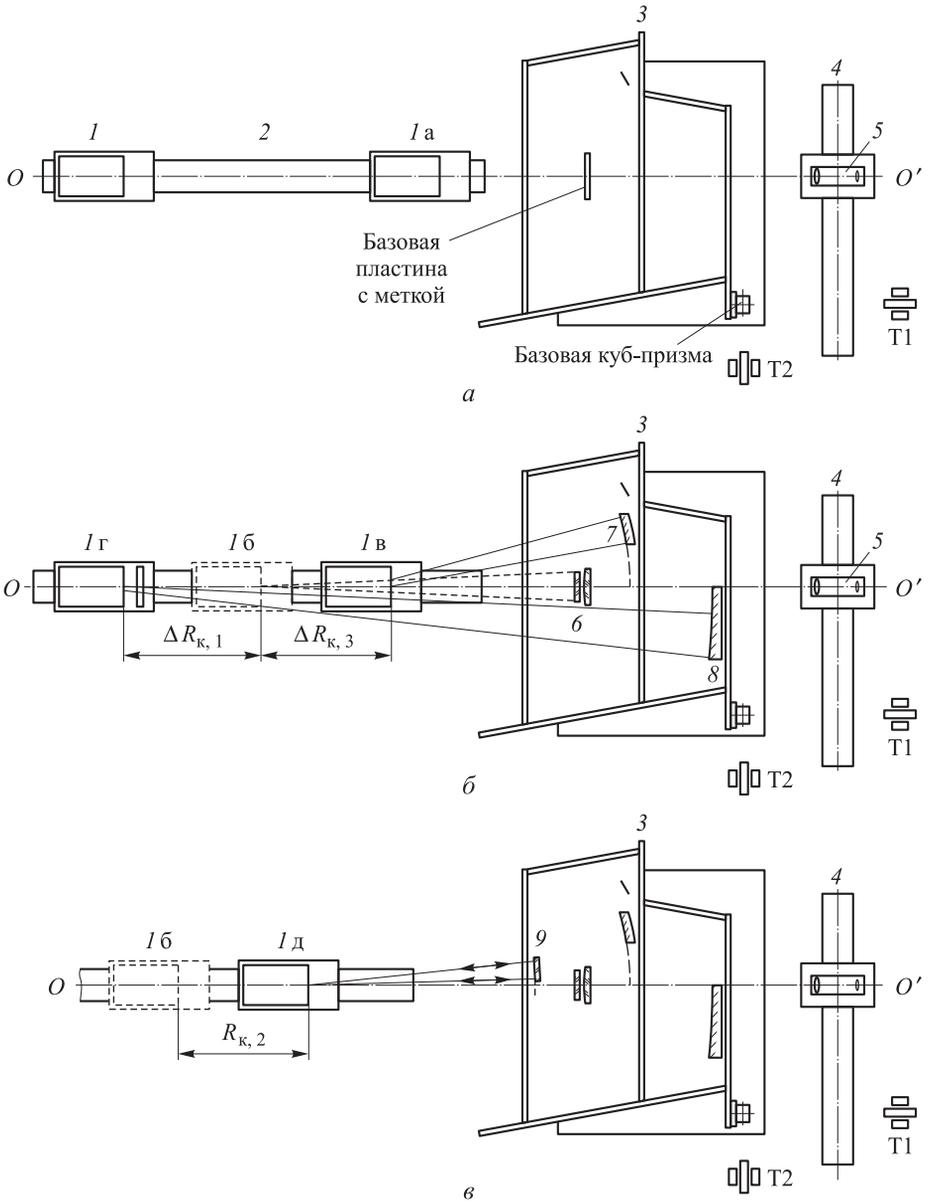


Рис. 5. Схемы сборки и выставления компонентов:

а — схема рабочего места для сборки и юстировки; б — схема установки ЛК, первого и третьего зеркала объектива; в — схема установки второго зеркала

мационные теодолиты Т1 и Т2, например марки Leica TM6100A, устанавливаются в требуемых местах (в прямой видимости базовых поверхностей компонентов) на собственных штативах. Визирное устройство 4 состоит из направляющих и установленной на них подвижной каретки 5 с закрепленной на ней визирной АК измерительной трубой типа ППС-031. Труба должна быть установлена горизонтально по уровню. Визирное устройство должно иметь отсчетное устройство (шкала, нониус) для точного измерения перемещений каретки 5 вдоль направляющих с погрешностью не более $\pm 0,01$ мм.

С помощью прибородержателя, теодолитов и базовой куб-призмы осуществляется постоянный контроль горизонтальности корпуса.

На посадочную поверхность линзового компенсатора (ЛК) закрепляют стеклянную базовую плоскопараллельную пластину с перекрестием, имитирующим геометрический центр ЛК со стороны визирного устройства. Плоская поверхность пластины с перекрестием должна иметь коэффициент отражения $\rho \approx 0,3$ и быть параллельна установочной плоскости базы с погрешностью не более 2 угл. с.

Сначала необходимо выставить параллельность поперечной линейки 4 зеркальной грани базовой куб-призмы. Затем каретка с АК трубой устанавливается напротив базовой куб-призмы и наклонами трубы совмещаются АК блики в окуляре трубы.

Далее каретка перемещается по направляющим визирного устройства до уровня перекрестия на базовой пластине, имитирующей центр ЛК и в окуляр АК трубы наблюдается АК блик от стеклянной базовой пластины. Доработкой посадочного места под линзовый компенсатор добиваются того, чтобы изображения сетки и ее АК отражения от стекла базы были строго совмещены.

Сфокусировав АК трубу, получают резкое изображение метки на базовой пластине. Путем поперечных перемещений АК трубы совмещают изображение метки с центром перекрестия сетки в окуляре. Оптическая ось АК трубы в данном положении будет задавать оптическую ось объектива (ось OO' на рис. 5, а).

Далее направляющие 2 выставляют параллельно, а интерферометр — соосно оптической оси АК трубы. Для этого необходимо:

- снять с посадочного места под линзовый компенсатор стеклянную плоскопараллельную базовую пластину с перекрестием;
- горизонтально выставить направляющие визирного устройства;
- включить интерферометр, установленный на каретке, в режим настройки на «бесконечность»;
- сфокусировать АК трубу на «бесконечность» и наблюдать в окуляр изображение точечного источника;

• последовательно устанавливая каретку с интерферометром в крайние положения I , Ia и промежуточные на направляющих, регулировкой направляющих и разворотом интерферометра совместить оптические оси интерферометра и АК трубы для наблюдения изображения точечного источника.

В результате проведенных работ обеспечивается соосность оси интерферометра и оптической оси изделия OO' во всех положениях каретки при ее перемещении вдоль направляющих визирного устройства 4.

Выставление базового положения линзового компенсатора. Предварительно отцентрированный в оправе линзовый компенсатор 6 (рис. 5, б) устанавливают на посадочное место в корпус объектива. Каретка с интерферометром перемещается на аттестованное расстояние от вершины последней поверхности линзового компенсатора в положение $Iб$. Включив интерферометр в рабочий режим, можно наблюдать изображение интерферограммы, а включив осветитель АК модуля трубы — наблюдать АК блик от первой поверхности ЛК.

Наблюдая одновременно АК блик и интерферограмму, следует убедиться в том, что оптическая ось ЛК совпадает с визирными осями интерферометра и АК трубы.

При необходимости производится дополнительная доводка посадочного места под ЛК. Минимальными продольными перемещениями интерферометра вдоль оси OO' добиваются минимизации волновых aberrаций. Погрешность децентрировки ЛК не должна превышать 2 угл. с.

Данное положение линзового компенсатора будет базовым для выставления остальных оптических элементов.

Установка третьего зеркала на посадочное место в объектив. Зеркало в оправе 7 устанавливают на посадочное место в корпус объектива (см. рис. 5, б). С помощью визирного устройства зеркало выставляют на аттестованное расстояние h_3 от оптической оси с погрешностью не более 0,02 мм.

По фактическим паспортным и расчетным данным A_i , A_3 , а также по аттестованному отрезку R_3 рассчитывают расстояние $\Delta R_{к,3}$, на которое необходимо передвинуть интерферометр для юстировки зеркала 7.

Каретка с интерферометром перемещается вдоль направляющей на величину $\Delta R_{к,3}$ в положение $Iв$, соответствующее аттестованному расстоянию R_3 с погрешностью не более $\pm 0,02$ мм. Включив интерферометр в рабочий режим, получают изображение интерферограммы.

Минимальными наклонами, разворотом, а также продольным перемещением детали 7 добиваются минимизации волновых aberrаций

зеркала. Если полученная интерференционная картина и остаточные волновые aberrации соответствуют паспортным данным на деталь, то зеркало 7 установлено правильно (т. е. его центр кривизны и главная оптическая ось совпадают с осью изделия OO').

Установка первого зеркала на посадочное место в объектив. Сначала необходимо вернуть каретку с интерферометром в исходное положение – в позицию 1б. Затем зеркало в оправе 8 устанавливают на его посадочное место в корпус объектива (см. рис. 5, б).

С помощью визирного устройства 4 зеркало выставляют на аттестованное расстояние h_1 от оптической оси с погрешностью не более 0,02 мм.

По фактическим паспортным и расчетным данным A_i, A_1 , а также по аттестованному отрезку R_1 определяют расстояние $\Delta R_{к,1}$, на которое необходимо передвинуть интерферометр для юстировки зеркала 8.

В схему интерферометра устанавливают компенсатор aberrаций гиперблоида и каретку 1 перемещают вдоль направляющей на величину $\Delta R_{к,3}$ в положение 1г, соответствующее аттестованному отрезку R_1 с погрешностью не более $\pm 0,02$ мм. Включив интерферометр в рабочий режим, получают изображение интерферограммы.

При необходимости небольшими подвижками детали 8 добиваются минимизации волновых aberrаций зеркала. Критерием правильности установки служит соответствие интерференционной картины и остаточных волновых aberrаций паспортным данным на деталь (т. е. его центр кривизны и главная оптическая ось совпадают с осью изделия OO').

Установка второго зеркала на посадочное место в объектив. Возвращаем каретки с интерферометром и АК трубой в исходные положения: каретку 1 с интерферометром в позицию 1б, каретку 5 с АК трубой – соосно оси OO' . Затем зеркало 9 в оправе устанавливают на посадочную поверхность в корпус объектива (рис. 5, в).

По фактическим паспортным и расчетным данным $A_i, A_{2a}, A_{2б}$, а также по аттестованным отрезкам $R_{2a}, R_{2б}$ рассчитывают расстояние $\Delta R_{к,2}$, на которое необходимо передвинуть интерферометр для юстировки зеркала 9.

Каретка 1 с интерферометром перемещается вдоль направляющей на величину $\Delta R_{к,2}$ в положение 1д, соответствующее аттестованным расстояниям $R_{2a}, R_{2б}$ с погрешностью не более $\pm 0,02$ мм.

Включив интерферометр в рабочий режим наклонами, разворотом, поперечными и продольными перемещениями оправы зеркала 9, на экране монитора получают изображение интерферограммы. Далее минимальными подвижками детали добиваются минимизации волновых aberrаций.

Если полученная интерферограмма и остаточные волновые аберрации соответствуют паспортным данным на деталь, то зеркало 9 установлено правильно.

При тщательном выполнении предписаний, изложенных выше, можно избежать ошибок, обусловленных наклоном, разворотом и децентрировкой оптических элементов в момент сборки и юстировки объектива. Остаточные аберрации оптической системы, обусловленные ошибками установки воздушных промежутков между деталями ввиду погрешностей перемещения интерферометра, аттестации вершинного отрезка асферической поверхности головного зеркала, погрешностей разворотов, могут быть компенсированы дальнейшей юстировкой изделия.

Контроль и доводка оптической системы. Операция контроля и доводки проводится по схеме, приведенной на рис. 6. Перед входным окном объектива устанавливают плоское эталонное зеркало. С помощью теодолитов плоское зеркало разворачивают на необходимый угол относительно зеркальных граней куб-призмы так, чтобы оно было перпендикулярно визирной оси прибора.

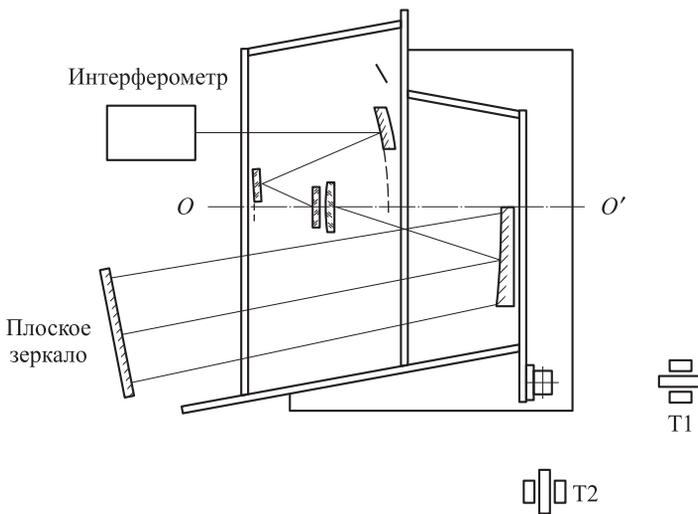


Рис. 6. Схема контроля и доводки объектива

Интерферометр для контроля объектива размещают в соответствии с тем, как показано на рис. 6. Для выставления прибора параллельно оптической оси объектива используют теодолиты. Включив интерферометр в режим юстировки, продольными перемещениями интерферометра добиваются четкого изображения АК блика, поперечными перемещениями совмещают АК блик с перекрестием сетки интерферометра. Затем интерферометр переключают в рабочий режим и получают изображение интерферограммы.

Далее выполняется компенсация ошибок установки воздушных промежутков. Используя сводку влияния параметров оптической системы, определяют воздушные промежутки, оказывающие наибольшее влияние на характеристики качества. Последовательно изменяя величину воздушных промежутков (с шагом, не превышающим допуск), добиваются компенсации осесимметричных ошибок волнового фронта оптической системы. Наибольшее влияние будет оказывать положение второго зеркала объектива.

Аттестацию оптической системы проводят путем измерений волновых aberrаций в центре и на краях углового поля при перемещении интерферометра в крайние положения, соответствующие краям углового поля оптической системы.

Установка компоновочного зеркала на посадочное место в объектив. Плоское компоновочное зеркало в оправе устанавливают на его посадочное место в корпус объектива (рис. 7). С тыльной стороны компоновочного зеркала размещают теодолит ТЗ (напротив юстировочной базы зеркала). По автоколлимации от юстировочной базы плоское компоновочное зеркало разворачивается на необходимый угол к оптической оси.

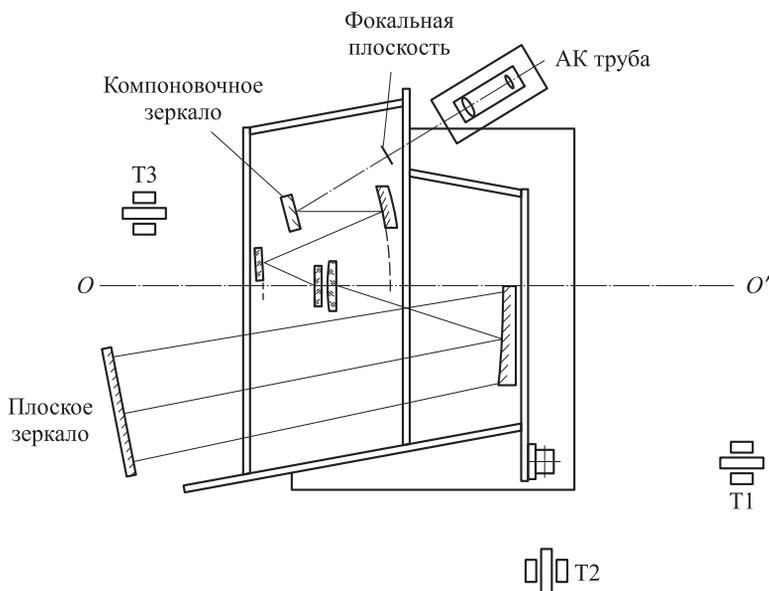


Рис. 7. Схема установки компоновочного зеркала

Со стороны фокальной плоскости объектива устанавливается АК труба, которая фокусируется на фокальную плоскость объектива, используя нитяное перекрестие или другие вспомогательные метки. Включив осветитель АК модуля трубы, с помощью перемещений компоновочного зеркала добиваются резкого изображения АК блика.

Заключение. Предложенная методика сборки и юстировки перспективного нового зеркально-линзового объектива с эксцентрично расположенным полем изображения, состоящего из трех зеркал (одно из которых имеет асферическую поверхность второго порядка), линзового компенсатора и плоского компоновочного зеркала, основана на использовании интерференционных методов контроля. Последовательность сборки и юстировки рассмотрена на конкретном примере, что, однако, не исключает возможность использования элементов данной методики для сборки и юстировки других схем зеркальных и зеркально-линзовых объективов с эксцентрично расположенным полем изображения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Токарев А.А. Длиннофокусные объективы с эксцентрично расположенным полем изображения. *Известия высших учебных заведений. Сер. Приборостроение*, 1988, т. XXXI, № 7, с. 74–79.
- [2] Архипов С.А., Кравченко С.О., Ли А.В., Морозов С.А. Аппаратура среднего разрешения. Варианты схемных решений оптической системы с общим входным зрачком видимого и ближнего инфракрасного каналов. *Сб. материалов IX науч.-техн. конф. «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли»*, г. Геленджик, 17–21 сентября 2012 г. Москва: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ–ПРОГРЕСС» – НПП «ОПТЭКС», 2012, с. 146.
- [3] Архипов С.А., Заварзин В.И., Заварзина В.В., Кравченко С.О., Морозов С.А., Сеник Б.Н. *Зеркально-линзовый объектив (варианты)*. Пат. № 2461030 Российская Федерация, МПК G02B 5/10.
- [4] Архипов С.А., Заварзин В.И., Малыхин В.А., Морозов С.А. Юстировка и аттестация длиннофокусного трехзеркального объектива с эксцентричным полем изображения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2009, № 4, с. 24–36.
- [5] Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е., Черкашин В.В. Лазерная интерферометрическая система ФТИ-100 с фазовым сдвигом для прецизионного оптического контроля. *Сб. материалов VII Междунар. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011» направления «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии»*, 19–29 апреля 2011 г., Новосибирск. Новосибирск, СГГА, 2011, 218 с.
- [6] Гоев А.И., Заварзин В.И., Перов В.А., Потелов В.В. *Сборка и юстировка оптико-электронных приборов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, 80 с.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Заварзин В.И., Ли А.В., Морозов С.А. Методика сборки и юстировки зеркально-линзовых объективов с эксцентрично расположенным полем изображения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/822.html>

Заварзин Валерий Иванович родился в 1956 г., окончил МВТУ им. Н. Э. Баумана в 1980 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований», декан факультета «Оптико-электронное приборостроение» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Автор более 100 научных публикаций в области оптического приборостроения. e-mail: zavarzin@bmstu.ru

Ли Александр Викторович родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных публикаций. e-mail: alvik87@gmail.com

Морозов Сергей Александрович родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Аспирант кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных публикаций в области оптического приборостроения. e-mail: s.morozov@mail.ru