

УДК 681.7.028

Юстировка зеркально-линзового объектива с эксцентрично расположенным зрачком для инфракрасного диапазона спектра

© 2021 г. **В. И. Вензель, А. А. Семёнов**

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

E-mail: electron@niioep.ru

Поступила в редакцию 03.12.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-05-82-89

Предложена методика юстировки коллиматорного широкоугольного зеркально-линзового объектива для инфракрасного диапазона спектра с эксцентрично расположенным зрачком, выполненного по схеме Кассегрена с предфокальным линзовым компенсатором. В методике совмещены интерференционные способы определения положения оси асферического главного зеркала и положения вторичного зеркала с автоколлимационным способом центрировки линз компенсатора. Все операции юстировки проводятся в штатном корпусе объектива без привязки к геометрическим базам оптических элементов.

Приведены анализ погрешностей юстировки и результаты контроля изготовленного объектива.

Ключевые слова: зеркально-линзовый объектив, эксцентрично расположенный зрачок, юстировка, центрировка, погрешности юстировки.

Коды OCIS: 220.0220, 080.1005

Задача комплексных испытаний оптико-электронных приборов наблюдения и обнаружения для инфракрасного (ИК) диапазона спектра, включающих определение таких показателей назначения как обнаружительная способность, вероятность распознавания объектов, погрешность целеуказания, требует создания объективов коллиматоров, имеющих высокие абберрационные характеристики на большом угловом поле и входной зрачок без экранирования. В основном для этих целей используются центрированные объективы-брахиты с эксцентрично расположенным зрачком.

Создание таких объективов с большим фокусным расстоянием и большим входным зрачком требует решения целого комплекса технических и технологических проблем. В частности, их юстировка представляет собой доста-

точно сложную техническую задачу в связи с большими габаритами объектива и высокими допусками на взаимную установку элементов. Решению подобных задач посвящены, например, работы [1–4].

Основной задачей юстировки центрированных систем является совмещение в пространстве осей всех оптических элементов.

Особенностью данной методики является отсутствие требований к предварительному определению положения осей оптических элементов относительно собственных геометрических баз.

Для юстировки объектива в автоколлимационной схеме используется минимум дополнительных элементов — полноразмерное плоское автоколлимационное зеркало и дополнительное плоское автоколлимационное

зеркало с механизмами наклона по двум ортогональным координатам. Также при юстировке используются две визирные трубы, автоколлиматор, теодолит и два интерферометра (видимого и ИК диапазонов [5]) с установочными устройствами.

В статье приведены методика юстировки, оценка погрешностей установки элементов и результаты юстировки зеркально-линзового коллиматорного объектива с эксцентрично расположенным зрачком для ИК диапазона со следующими параметрами:

- фокусное расстояние, мм 5000,
- диаметр зрачка, мм 500,
- угловое поле зрения, град 1,0
- спектральный диапазон, мкм 2,5–4,5,
- концентрация энергии в пятне 100 мкм, $K_{Э100}$, % не менее 75.

Оптическая схема объектива коллиматора приведена на рис. 1.

Принципиальная схема объектива коллиматора приведена на рис. 2.

Особенностью предложенной схемы ИК объектива является высокая технологичность. Благодаря этому удастся получить желаемое качество изображения без усложнения конструкции при минимальном количестве юстировочных операций.

Объектив коллиматора с эксцентрично расположенным зрачком построен по схеме

Кассегрена с внеосевым параболическим главным зеркалом, сферическим вторичным зеркалом и предфокальным двухлинзовым компенсатором с двумя внеосевыми сферическими линзами. Эксцентричные линзы изготовлены таким образом, что включают вершины.

Для юстировки вторичного сферического зеркала предусмотрены штатные угловые

Таблица 1. Допуски на децентрировку оптических элементов

Оптический элемент	Децентрировка поверхности	
	Δy , мм	$\Delta \varphi$, угл. с
Главное зеркало	0,4	14
Вторичное зеркало	0,5	–
Первая поверхность первой линзы компенсатора	0,1	–
Вторая поверхность первой линзы компенсатора	0,1	–
Первая поверхность второй линзы компенсатора	0,1	–
Вторая поверхность второй линзы компенсатора	0,1	–
Первая линза компенсатора	3	360
Вторая линза компенсатора	0,6	720

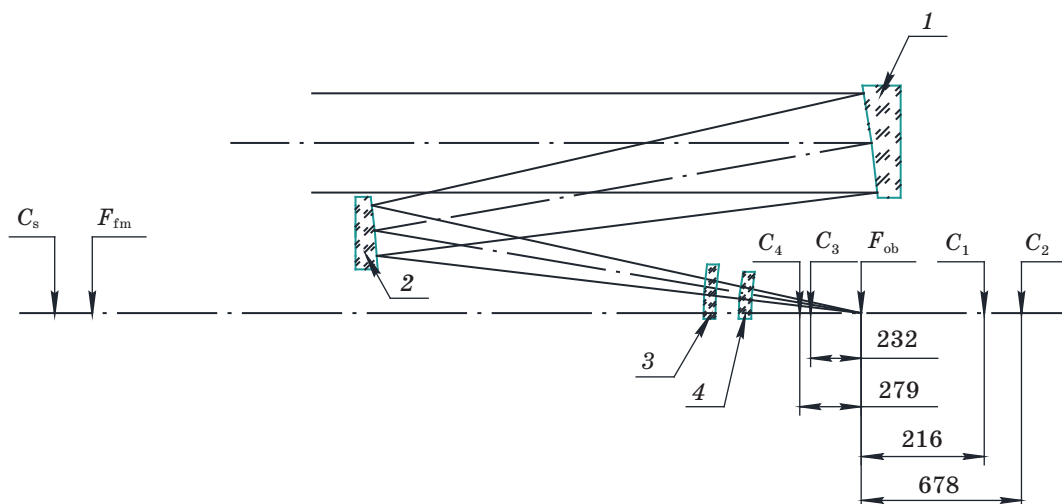


Рис. 1. Оптическая схема объектива коллиматора. 1 — главное параболическое зеркало, 2 — вторичное сферическое зеркало, 3 — первая линза компенсатора, 4 — вторая линза компенсатора, F_{ob} — фокальная точка объектива, F_{fm} — фокальная точка главного зеркала, C_s — центр кривизны вторичного сферического зеркала, C_1 — центр кривизны первой поверхности первой линзы компенсатора, C_2 — центр кривизны второй поверхности первой линзы компенсатора, C_3 — центр кривизны первой поверхности второй линзы компенсатора, C_4 — центр кривизны второй поверхности второй линзы компенсатора.

подвижки, обе линзы компенсатора юстируются с помощью установки прокладок между оправами линз и держателем компенсатора и смещения в зазорах крепления оправ к держателю компенсатора.

Объектив коллиматора выполнен в едином корпусе, включающем горизонтальное основание и вертикальные несущие ребра.

Расчетные допуски на децентрировку оптических элементов приведены в табл. 1.

Для достижения целей юстировки объектива используется тот факт, что в центрированном объективе фокальная точка объектива, фокальная точка параболического главного зеркала, центр кривизны вторичного зеркала и центры кривизны линз компенсатора долж-

ны находиться на единой оси, совпадающей с истинной осью параболического внеосевого главного зеркала (см. рис. 1).

Операции установки расстояний между элементами не описаны в связи с тем, что при расчетных допусках достигаются известными методами.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИСТИННОЙ ОСИ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА И ЕЕ УСТАНОВКА ОТНОСИТЕЛЬНО ПОСАДОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОРПУСА

Схема определения положения истинной оси внеосевого параболического главного зеркала приведена на рис. 3.

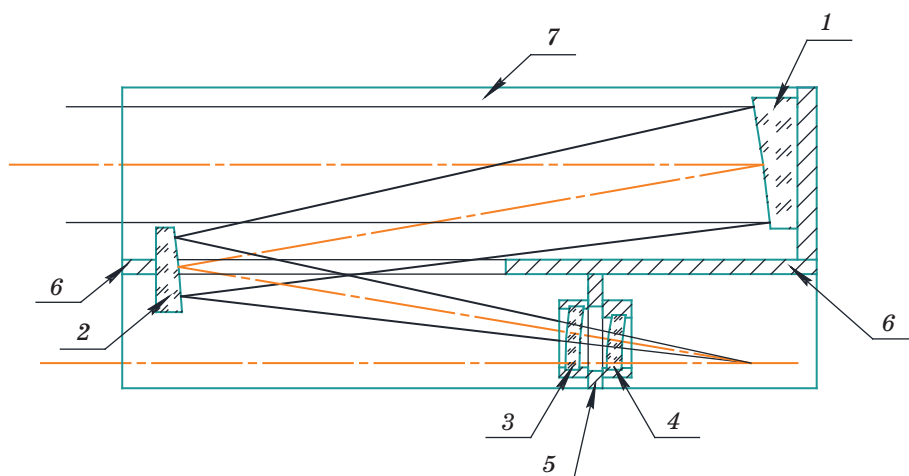


Рис. 2. Принципиальная схема объектива коллиматора. 1 — главное параболическое зеркало, 2 — вторичное сферическое зеркало, 3 — первая линза компенсатора в оправе, 4 — вторая линза компенсатора в оправе, 5 — держатель компенсатора, 6 — несущее ребро, 7 — основание.

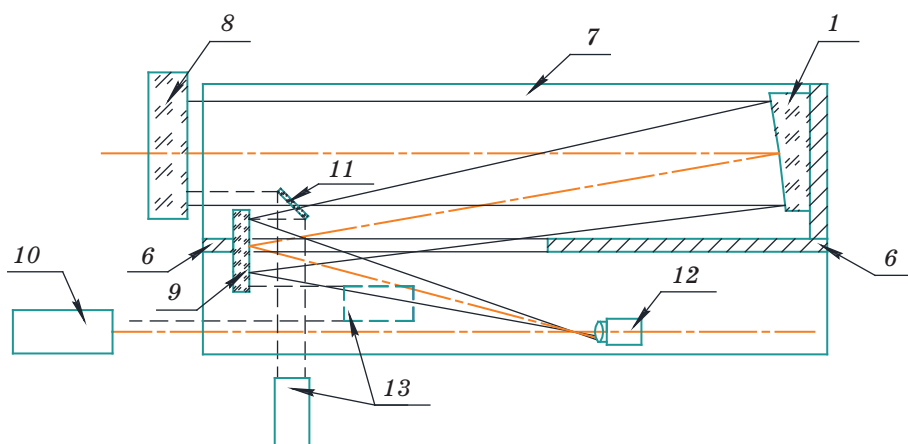


Рис. 3. Схема определения положения истинной оси главного зеркала. 1 — главное параболическое зеркало, 6 — несущее ребро, 7 — основание, 8 — плоское автоколлимационное зеркало, 9 — юстировочное плоское зеркало, 10 — визирная труба ППС-11, 11 — поворотное плоское зеркало, 12 — фазовый интерферометр с вынесенной точкой *Fisba*, 13 — автоколлиматор АК-05.

Перед операцией юстировки основание с предварительно установленным главным зеркалом выставляют горизонтально с помощью уровня и установочных винтов (не показаны) с погрешностью не более $1'$.

На первом этапе юстировки вместо вторичного сферического зеркала устанавливают юстировочное плоское зеркало таким образом, чтобы плоскость зеркала была приблизительно перпендикулярна истинной оси главного параболического зеркала. Предварительную установку зеркала проводят с использованием механических баз корпуса коллиматора. Использование дополнительного зеркала связано с экранированием пучка лучей элементами конструкции корпуса и сокращением габаритов юстировочной схемы.

Первая операция — определение положения фокальной точки главного параболического зеркала

Эту операцию проводят при снятых линзах компенсатора.

Фокальная точка главного зеркала совпадает с точкой минимальных аберраций в автоколлимационной схеме контроля с плоским зеркалом. При юстировке схемы контроля используются штатные угловые подвижки узла плоского зеркала, потому что использование в конструкции юстировочных подвижек главного зеркала для разовой операции установки нецелесообразно. Для корректировки положения зеркала относительно элементов корпуса используются прокладки между корпусом и оправой зеркала.

Для определения положения фокальной точки главного зеркала наклонами по двум координатам плоского автоколлимационного зеркала и трехкоординатными смещениями фазового интерферометра с вынесенной точкой добиваются минимума аберраций волнового фронта, последовательно отраженного от юстировочного плоского зеркала, главного параболического зеркала, плоского автоколлимационного зеркала.

Для минимизации аберраций фазовый интерферометр устанавливают таким образом, чтобы его фокальная точка совпадала с расчетным положением фокальной точки главного параболического зеркала. Наклонами плоского автоколлимационного зеркала и линейными смещениями интерферометра со-

вмещают фокальную точку интерферометра с автоколлимационной точкой системы «интерферометр — юстировочное плоское зеркало — главное зеркало — плоское автоколлимационное зеркало». Расшифровывают полученную интерферограмму, определяя полиномы Цернике. Компенсируют синусную и косинусную составляющие астигматизма третьего порядка наклоном плоского автоколлимационного зеркала и поперечным смещением интерферометра. При значениях составляющих астигматизма, близких к нулю, малыми наклонами автоколлимационного зеркала и смещениями фазового интерферометра добиваются минимума размаха аберраций. При минимуме аберраций фокальная точка фазового интерферометра будет находиться на истинной оси внеосевого параболического главного зеркала, сломанной юстировочным плоским зеркалом, а плоское автоколлимационное зеркало будет установлено перпендикулярно истинной оптической оси главного зеркала.

Затем юстировочное плоское зеркало устанавливают параллельно плоскому автоколлимационному зеркалу с помощью дополнительного поворотного зеркала и автоколлиматора АК-05. Автоколлиматор устанавливают так, чтобы разными частями зрачка одновременно наблюдать рефлексы от юстировочного и автоколлимационного зеркал.

После этого трехкоординатными смещениями интерферометра с вынесенной точкой добиваются бесконечно широкой полосы интерференционной картины.

В этом положении юстировочного плоского зеркала фокальная точка фазового интерферометра будет находиться на истинной оси главного зеркала, а истинная ось будет перпендикулярна автоколлимационному плоскому зеркалу.

Вторая операция — установка визирной трубы ППС-11 параллельно оси главного зеркала

Выполняется с помощью автоколлиматора АК-05. Его устанавливают перпендикулярно юстировочному плоскому зеркалу таким образом, чтобы автоколлиматор работал половиной апертуры, затем ось встречно расположенной визирной трубы ППС-11 угловыми подвижками устанавливают параллельно оси автоколлиматора АК-05.

После этого визирная труба ППС-11 фокусируется на фокальную точку интерферометра и линейными подвижками установочного устройства ось визирной трубы совмещается с истинной осью главного параболического зеркала.

Третья операция — определение положения истинной оси главного зеркала относительно несущего ребра и меридиональной (горизонтальной) плоскости

Для этого самоустанавливающийся теодолит размещают соосно визирной трубе и измеряют отклонение истинной оси главного зеркала от горизонта и нормали к несущему ребру с помощью плоского зеркала.

Четвертая операция — расчет и корректировка

Корректировка осуществляется с помощью прокладок положения главного зеркала относительно несущего ребра и горизонта так, чтобы ось была параллельна горизонтальному основанию и несущему ребру с погрешностью не более 1'.

Пятая операция — повторение первой и второй операций по определению положения истинной оси главного зеркала и установке на нее визирной трубы

Угловая погрешность определения положения истинной оси главного зеркала включает угловую погрешность установки автоколлимационного зеркала и погрешность переноса его нормали на визирную трубу

$$\delta_o = \sqrt{\delta_m^2 + 2\delta_{sm}^2 + \delta_t^2},$$

где δ_o — угловая погрешность определения положения оси главного зеркала (угл. с), $\delta_m = 6''$ — расчетное значение угловой погрешности установки автоколлимационного плоского зеркала по минимуму размаха aberrаций при остаточном астигматизме $0,1\lambda$ (λ — длина волны излучения), $\delta_{sm} = 5''$ — угловая погрешность установки дополнительного плоского зеркала с использованием АК-0,5, $\delta_t = 3''$ — угловая погрешность установки визирной трубы.

$$\delta_o = \sqrt{6^2 + 2 \times 5^2 + 3^2} \approx 10''.$$

Линейная погрешность определения положения истинной оси главного зеркала включает погрешности установки фокальной точки интерферометра и переноса положения точки на визирную трубу

$$\Delta_o = \sqrt{\Delta_m^2 + \Delta_t^2},$$

где Δ_o — линейная погрешность определения положения оси главного зеркала (мм), $\Delta_m = 0,125$ мм — расчетное значение линейной погрешности установки автоколлимационного плоского зеркала по минимуму размаха aberrаций при остаточном астигматизме $0,1\lambda$, $\Delta_t = 0,03$ мм — линейная погрешность наведения трубы при дистанции 2 м.

$$\Delta_o = \sqrt{0,125^2 + 0,03^2} = 0,128 \text{ мм.}$$

Погрешность установки истинной оси главного зеркала относительно горизонтального основания и несущего ребра здесь не учитывается, так как компенсатор в дальнейшем устанавливается на истинную ось главного зеркала, а положение вторичного зеркала корректируется в процессе окончательной юстировки с помощью ИК интерферометра.

ЮСТИРОВКА ЛИНЗОВОГО КОМПЕНСАТОРА

Схема юстировки линзового компенсатора и вторичного зеркала приведена на рис. 4.

При юстировке линз компенсатора устанавливают дополнительную визирную трубу ППС-11 встречно визирной трубе ППС-11, материализующей в пространстве истинную ось главного зеркала.

Первая операция — центрировка первой линзы компенсатора в оправе

Устанавливают оправу первой линзы линзового компенсатора в держатель компенсатора, при этом край линзы с вершиной частично перекрывает апертуры визирных труб ППС-11. Трубы фокусируются на центры кривизны поверхностей линзы. Устанавливая прокладки под оправу этой линзы компенсатора и смещая оправу в зазорах крепления, добиваются установки центров кривизны поверхностей линзы на истинную ось главного зеркала. После чего оправу линзы штифтуют

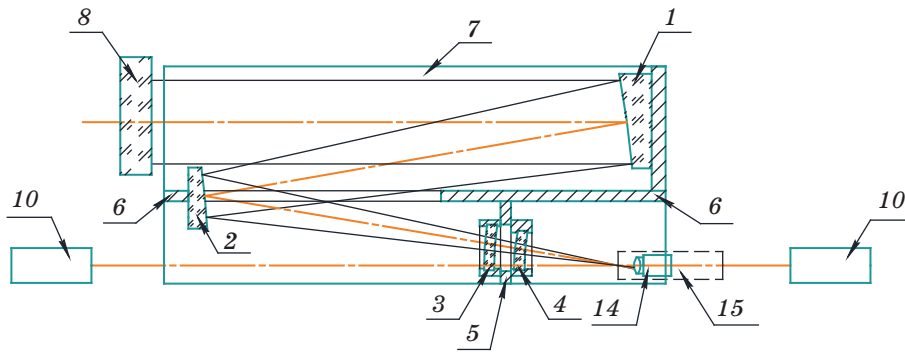


Рис. 4. Схема юстировки линзового компенсатора и вторичного сферического зеркала. 1 — главное параболическое зеркало, 2 — вторичное сферическое зеркало, 3 — первая линза компенсатора, 4 — вторая линза компенсатора, 5 — держатель компенсатора, 6 — несущее ребро, 7 — основание, 10 — визирная труба ППС-11, 14 — ИК интерферометр, 15 — направляющая ИК интерферометра.

к держателю компенсатора для однозначной установки.

Погрешность установки центров кривизны линз линзового компенсатора включает погрешность установки визирной трубы ППС-11 и погрешность, вызванную дискретностью толщины прокладок под оправы линз.

Децентрировка первой поверхности первой линзы компенсатора составляет

$$\Delta_1 = \sqrt{\Delta_t^2 + \Delta_f^2},$$

где Δ_1 — погрешность установки первой поверхности линзы (мкм), $\Delta_t = 20 + 5L$ — погрешность наведения трубы ППС-11 (мкм), $L \approx 2,5$ м — расстояние от визирной трубы ППС-11 до центра кривизны первой поверхности первой линзы, $\Delta_f = 0,5tR_1/D_1$ — погрешность, вызванная подбором прокладок, (мкм), $t = 10$ мкм — толщина прокладки, $R_1 = 800$ мм — радиус центрируемой поверхности, $D_1 = 160$ мм — диаметр оправы линзы.

$$\Delta_1 = \sqrt{32,5^2 + 24,5^2} \approx 41 \text{ мкм.}$$

Децентрировка второй поверхности первой линзы компенсатора составляет

$$\Delta_2 = \sqrt{\Delta_{t1}^2 + \Delta_{t2}^2 + \Delta_f^2},$$

где Δ_2 — погрешность установки второй поверхности линзы (мкм), $\Delta_{t1} = 20 + 5L$ — погрешность наведения трубы ППС-11 (мкм), $L_1 \approx 3,5$ м — расстояние от визирной трубы ППС-11 до перекрестия второй визирной трубы ППС-11, $\Delta_{t2} = 20 + 5L$ — погрешность на-

ведения трубы ППС-11 (мкм), $L_2 \approx 0,5$ м — расстояние от второй визирной трубы ППС-11 до центра кривизны второй поверхности линзы, $\Delta_f = 0,5tR_2/D_2$ — погрешность, вызванная подбором прокладок, (мкм), $t = 10$ мкм — толщина прокладки, $R_2 = 1200$ мм — радиус центрируемой поверхности, $D_2 = 160$ мм — диаметр оправы линзы.

$$\Delta_2 = \sqrt{37,5^2 + 22,5^2 + 37^2} \approx 57 \text{ мкм.}$$

Вторая операция — центрировка второй линзы компенсатора в оправе

Первую линзу снимают и по такой же методике устанавливают вторую линзу компенсатора. После чего оправу этой линзы штифтуют к держателю компенсатора для однозначной установки.

Децентрировка первой поверхности второй линзы компенсатора составляет

$$\Delta_3 = \sqrt{\Delta_t^2 + \Delta_f^2},$$

где Δ_3 — погрешность установки первой поверхности линзы (мкм), $\Delta_t = 20 + 5L$ — погрешность наведения трубы ППС-11 (мкм), $L \approx 2,1$ м — расстояние от визирной трубы ППС-11 до центра кривизны второй линзы компенсатора, $\Delta_f = 0,5tR_3/D_3$ — погрешность, вызванная подбором прокладок, (мкм), $t = 10$ мкм — толщина прокладки, $R_3 = 300$ мм — радиус центрируемой поверхности, $D_3 = 160$ мм — диаметр оправы линзы.

$$\Delta_3 = \sqrt{30,5^2 + 9,3^2} \approx 32 \text{ мкм.}$$

Децентрировка второй поверхности второй линзы компенсатора составляет

$$\Delta_4 = \sqrt{\Delta_{t1}^2 + \Delta_{t2}^2 + \Delta_f^2},$$

где Δ_4 — погрешность установки второй поверхности линзы, $\Delta_{t1} = 20 + 5L$ — погрешность наведения трубы ППС-11 (мкм), $L_1 \approx 3,5$ м — расстояние от визирной трубы ППС-11 до перекрестия второй визирной трубы ППС-11, $\Delta_{t2} = 20 + 5L$ — погрешность наведения трубы ППС-11 (мкм), $L_2 \approx 1,2$ м — расстояние от второй визирной трубы ППС-11 до центра кривизны второй поверхности линзы, $\Delta_f = 0,5tR_4/D_4$ — погрешность, вызванная подбором прокладок, (мкм), $t = 10$ мкм — толщина прокладки, $R_4 = 250$ мм — радиус центрируемой поверхности, $D_4 = 160$ мм — диаметр оправы линзы.

$$\Delta_4 = \sqrt{37,5^2 + 26^2 + 8^2} \approx 47 \text{ мкм.}$$

ЮСТИРОВКА ВТОРИЧНОГО ЗЕРКАЛА

Первая операция — установка ИК интерферометра

Снимают вторую линзу компенсатора и дополнительную трубу ППС-11 (рис. 4).

Устанавливают направляющую и ИК интерферометр. Регулируя винты направляющей, добиваются сохранения положения фокальной точки объектива ИК интерферометра на истинной оси главного зеркала при перемещении ИК интерферометра вдоль направляющей с использованием визирной трубы ППС-11 10.

Вторая операция — центрировка вторичного зеркала

Снимают плоское технологическое зеркало, устанавливают штатное сферическое зеркало, затем обе линзы компенсатора. При установке линз расчетные допуски (табл. 1) значительно превышают технологическую погрешность установки, поэтому при оценке погрешности операций снятия и повторной установки на штифты оправ линз не учитываются.

Смещениями сферического зеркала и ИК интерферометра вдоль истинной оси добиваются получения интерференционной картины с бесконечно широкой полосой.

Таблица 2. Погрешности установки оптических элементов

Оптический элемент	Децентрировка поверхности	
	Δy , мм	$\Delta \phi$, угл. с
Главное зеркало	0,128	10
Вторичное зеркало	0,068	—
Первая поверхность первой линзы компенсатора	0,041	—
Вторая поверхность первой линзы компенсатора	0,058	—
Первая поверхность второй линзы компенсатора	0,032	—
Вторая поверхность второй линзы компенсатора	0,047	—

Линейная погрешность установки сферического зеркала пересчитывается через влияние поперечного смещения фокальной точки интерферометра относительно истинной оси главного зеркала

$$\Delta_s = K\Delta_i,$$

где Δ_s — погрешность установки центра кривизны сферической поверхности (мкм), $K = 1,8$ отн. ед. — коэффициент влияния поперечного смещения фокальной точки интерферометра относительно истинной оси на децентрировку центра кривизны сферической поверхности (определяется с использованием ZEMAX), $\Delta_i = \Delta_t$ — погрешность установки интерферометра (мкм), $\Delta_t = 20 + 5L$ — погрешность наведения трубы ППС-11 (мкм), $L \approx 3,5$ м — расстояние от визирной трубы ППС-11 до фокальной точки ИК интерферометра.

$$\Delta_s = 1,8 \times 37,5 \approx 68 \text{ мкм.}$$

Технологические погрешности установки оптических элементов приведены в табл. 2. В ходе юстировки объектива децентрировка поверхностей каждого оптического элемента не превышает расчетного значения, вследствие чего ухудшение качества изображения в центре и на краю поля изображения не должно превышать допустимые значения, а объективу не требуются дополнительные юстировочные операции.

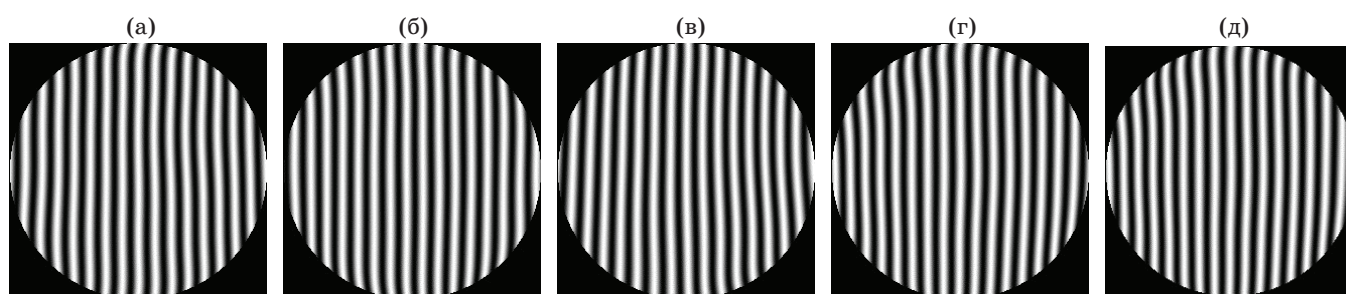


Рис. 5. Результаты контроля объектива на рабочей длине волны 3,39 мкм в центре и на краях поля зрения. (а) — центр поля, $KЭ_{100} = 82,3\%$, размах волнового фронта $PV = 0,347$, среднее квадратическое отклонение $RMS = 0,051$, (б) — угловое поле $X + 30'$, $KЭ_{100} = 81,2\%$, $PV = 0,2$, $RMS = 0,036$, (в) — угловое поле $X - 30'$, $KЭ_{100} = 82,2\%$, $PV = 0,439$, $RMS = 0,088$, (г) — угловое поле $Y + 30'$, $KЭ_{100} = 81,1\%$, $PV = 0,450$, $RMS = 0,082$, (д) — угловое поле $Y - 30'$, $KЭ_{100} = 81,1\%$, $PV = 0,450$, $RMS = 0,082$.

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Заключительная операция — определение волновых aberrаций в центре и по полю зрения объектива и концентрации энергии $KЭ_{100}$ в пятне 100 мкм.

На рис. 5 приведены результаты интерференционного контроля объектива на рабочей

длине волны 3,39 мкм и измерения $KЭ_{100}$ в спектральном диапазоне 2,5–4,5 мкм в центре и на краях поля зрения.

Погрешность установки оптических элементов по приведенной методике не превышает расчетных допусков, что подтверждается результатами контроля двух изготовленных объективов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларионов Н.П. Юстировка двухзеркальных коллиматоров с внеосевыми асферическими зеркалами // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 6. С. 37–44.
2. 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.
3. 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>
4. Колючкин В.Я., Одинокоев С.Б., Горевой А.Б. Методика контроля оптических систем интерференционным методом // Контентант, электрон. журн. 2015. № 3. С. 12–24.
5. Вензель В.И., Горелов А.В. Интерферометры среднего и дальнего инфракрасного диапазона спектра ИКИ- 3,5 и ИКИ-10 // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 11. С. 47–49.