

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВНЕОСЕВЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

© 2010 г. Н. П. Ларионов, канд. техн. наук; А. В. Лукин, доктор техн. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, Казань

E-mail: nrogipo@tnpko.ru

Рассмотрена методика контроля внеосевых асферических зеркал. Подробно обсуждается вопрос об измерении расстояния от центра отражающих поверхностей внеосевых асферических зеркал до оптических осей соответствующих осесимметричных асферических поверхностей вращения. Устройство для контроля состоит из интерферометра типа Тваймана–Грина и измерителя линейных перемещений. Рабочая ветвь интерферометра имеет синтезированный голограммный оптический элемент, состоящий из трех соосных осевых синтезированных голограмм, выполненных на общей рабочей поверхности подложки; измеритель линейных перемещений содержит визирный микроскоп. Методика может быть использована при контроле внеосевых асферических зеркал с отражающими поверхностями как вогнутой, так и выпуклой формы для различных оптических систем, а также асферических сегментов зеркал оптических телескопов, в том числе и при контроле их позиционирования.

Ключевые слова: внеосевое асферическое зеркало, внеосевой параметр, синтезированный голограммный оптический элемент, сегменты составных зеркал телескопов.

Коды OCIS: 220.1140

Поступила в редакцию 29.01.2010

Внеосевые асферические зеркала используются в оптических системах зеркальных коллиматоров [1–3], солнечных телескопов (система брахит) [4], а также в качестве сегментов составных главных и вторичных зеркал оптических телескопов [5, 6]. Отражающие поверхности внеосевых асферических зеркал не имеют осей симметрии: они представляют собой части соответствующих им осесимметричных асферических поверхностей вращения. Эта их особенность используется в данной работе. Важным параметром таких зеркал является расстояние от центра их отражающих поверхностей до осей симметрии соответствующих им осесимметричных асферических поверхностей. Для внеосевых асферических зеркал, используемых в высокоточных оптических системах, например, в двухзеркальных коллиматорах, допуск на указанные расстояния может составлять менее десятой доли миллиметра. В работах, в которых рассматриваются вопросы формообразования и контроля внеосевых асферических зеркал (например [7, 8]), отсутствуют сведения о методах и точности определения этих расстояний. Однако данные об этом параметре имеют важное значение для осуществления процессов

сборки и юстировки оптических систем, содержащих два и более внеосевых асферических зеркал.

В данной статье рассматриваются сущность метода и устройство для контроля внеосевых асферических зеркал, в частности, для измерения расстояния от центра отражающей поверхности внеосевого асферического зеркала до оси симметрии соответствующей ему осесимметричной асферической поверхности вращения, то есть внеосевого параметра (термин, употребляемый в работе [7]). Схема устройства изображена на рис. 1. Ее основными составляющими являются интерферометр типа Тваймана–Грина с осевыми синтезированными голограммами (позиции 1–15) и измеритель линейных перемещений с визирным микроскопом, расположенный на юстировочном столе (позиции 16–19). Осветительная часть интерферометра состоит из лазера 1 и афокальной системы 2, на выходе которой формируется расширенный параллельный пучок лучей. Часть этого пучка отражается от светоделиителя 3, а другая часть проходит через него. Отраженный пучок направляется в опорную ветвь интерферометра, в которой установлено плоское образцовое зеркало 4 перпенди-

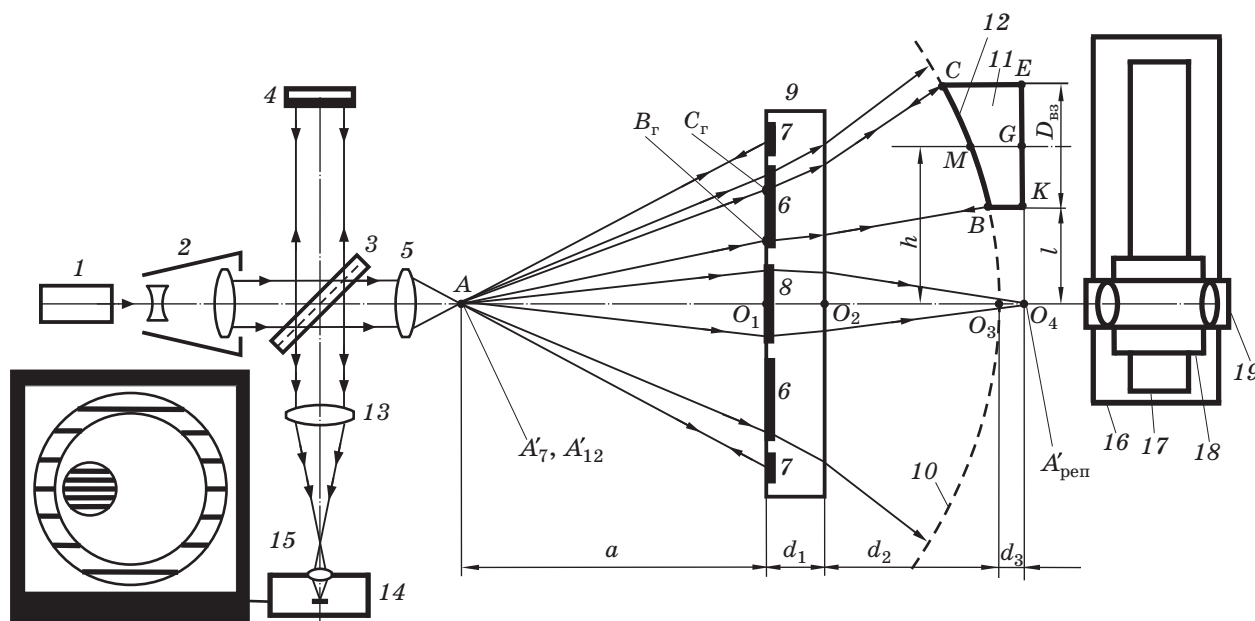


Рис. 1. Схема устройства для контроля внеосевых асферических зеркал.

кулярно к падающему на него параллельному пучку лучей. Пучок, прошедший светоделитель 3, поступает в рабочую ветвь интерферометра, в которой установлен объектив 5 для формирования точечного источника света A , синтезированный голограммный оптический элемент (СГОЭ) 9 с осевыми синтезированными голограммами 6, 7 и 8, соосно расположенными на его рабочей поверхности, и контролируемое внеосевое асферическое зеркало 11. В регистрирующей части, куда поступают пучки лучей из опорной и рабочей ветвей, помещены входной объектив 13, передающая камера 14 и монитор 15. За контролируемым внеосевым асферическим зеркалом 11 установлен юстировочный стол 16, оборудованный механизмами угловых поворотов и линейного смещения по высоте. На этом столе размещен измеритель линейных перемещений 17, на подвижной каретке 18 которого находится визирный микроскоп 19. Данный микроскоп снабжен механизмом угловых поворотов, а также механизмом линейных перемещений в трех взаимно перпендикулярных направлениях, одно из которых параллельно оптической оси микроскопа.

Внеосевое асферическое зеркало 11 имеет отражающую поверхность 12. Эта поверхность является частью осесимметричной асферической поверхности, которая изображена на рис. 1 штриховой линией 10. Вершина асферической

поверхности 10 расположена в точке O_3 ; поверхность 10 в данном случае является виртуальной.

У синтезированных голограмм 6, 7 и 8 общая ось симметрии (оптическая ось), которая пересекает рабочую поверхность СГОЭ 9 в точке O_1 . СГОЭ освещается точечным источником света A , находящимся от него на расстоянии a . При этом СГОЭ своей рабочей поверхностью обращен к источнику света A ; толщина его подложки равна d_1 .

Синтезированная голограмма 6 при освещении ее точечным источником света A формирует в проходящем свете пучок лучей, каждый из которых распространяется по соответствующей ему нормали к асферической поверхности 10 при условии, что вершина O_3 этой поверхности находится на расстоянии d_2 от точки O_2 на задней поверхности подложки СГОЭ 9. Поэтому она рассчитывается как голограмма-компенсатор [9] для контроля асферической поверхности 10 с заданными в схеме отрезками a , d_1 и d_2 . В связи с этим голограмма 6 может выполнять две функции: обеспечивать контроль формы отражающей поверхности 12 и контроль юстировки внеосевого асферического зеркала 11 после изготовления поверхности 12. Источник света A по условиям расчета голограммы 6 расположен на ее оптической оси, совпадающей с оптической осью асферической поверхности 10. Для обеспе-

чения выполнения этого условия, а также установки голограммы *6* в процессе ее юстировки на заданном расстоянии *a* от источника света *A* служит автоколлимационная голограмма *7* [10], которая формирует автоколлимационное изображение A'_7 точечного источника света *A*. Она рассчитывается так, чтобы условие автоколлимации выполнялось для заданного в схеме отрезка *a*. Таким образом, при юстировке голограммы *6* относительно точечного источника света *A* достаточно получить автоколлимационное изображение A'_7 этого источника, осуществляя продольное смещение и угловые наклоны СГОЭ *9*. При этом контроль ведется по интерференционной картине, наблюдаемой на экране монитора в кольцевой зоне (см. рис. 1). При достижении расстояния от источника света *A* до СГОЭ *9* значения, равного длине отрезка *a*, интерференционные полосы будут иметь вид полос с постоянным периодом. Затем угловыми наклонами СГОЭ эта интерференционная картина настраивается на бесконечно широкую полосу. Вследствие этого точечный источник света *A* выводится на оптическую ось голограммы *6*, которая, в свою очередь, задает оптическую ось рабочей ветви интерферометра, проходящую через точки *A* и O_1 . В результате достижения этого состояния в пространстве за СГОЭ *9* голограммой *6* формируется волновая поверхность на расчетном расстоянии d_2 от точки O_2 , совпадающая по форме с осесимметричной асферической поверхностью, частью которой является внеосевая отражающая поверхность *12*. Поэтому данная волновая поверхность задает в пространстве положение виртуальной осесимметричной асферической поверхности *10*, ось симметрии которой будет совмещена с оптической осью интерферометра, а ее вершина O_3 находится на расстоянии d_2 от точки O_2 на задней поверхности подложки СГОЭ *9*.

Синтезированная голограмма *8* предназначена для формирования в проходящем свете на оптической оси изображения $A'_{\text{реп}}$ точечного источника света *A* [11]. Это изображение должно быть расположено на специально выбранном расстоянии от точки O_2 . Изображение $A'_{\text{реп}}$ является светящейся точкой в виде пятна Эри, когда точечный источник *A* находится на оси симметрии голограммы *8* на расчетном расстоянии *a* от нее. Так как оптическая ось голограммы *8* в этом случае совпадает с оптической осью рабочей ветви интерферометра, то светящаяся дифракционная точка $A'_{\text{реп}}$ визуализирует положение оптической оси интерферометра

в пространстве за СГОЭ *9* и, значит, положение оси симметрии виртуальной асферической поверхности *10*.

Поскольку поверхность *12* внеосевого асферического зеркала *11* является частью осесимметричной асферической поверхности *10*, ей соответствует часть апертуры осевой синтезированной голограммы *6*. При этом точкам *C* и *B*, лежащим на краях апертуры зеркала *11*, соответствуют точки C_T и B_T на апертуре синтезированной голограммы *6*. Точки *E* и *K* внеосевого зеркала *11* лежат, соответственно, на дальнем и ближнем его краях относительно оси симметрии асферической поверхности *10* и одновременно на задней поверхности зеркала *11*. Точка *M* расположена в центре отражающей поверхности *12*, а точка *G* – в центре задней поверхности зеркала *11*. Светящаяся точка $A'_{\text{реп}}$ формируется голограммой *8* на оптической оси в точке O_4 , в которой оптическая ось пересекается с перпендикулярной к ней плоскостью, проходящей через точку *K*. При этом точка O_4 будет находиться от точки O_2 на расстоянии, равном сумме отрезков d_2 и d_3 ; длина отрезка d_3 находится на основании геометрических параметров внеосевого зеркала *11* и уравнения асферической поверхности *10*. Точки *A*, O_1 , O_2 , O_3 , $A'_{\text{реп}}$, *B*, *M*, *C*, *E*, *G*, *K*, C_T и B_T лежат в меридиональной плоскости. Точки *M* и *G* удалены от оси симметрии виртуальной асферической поверхности *10*, а следовательно, и от оптической оси интерферометра на расстояние *h*, которое является одним из важных параметров внеосевого асферического зеркала *11*. Для его измерения необходимо сначала нанести метку в виде перекрестия в центре задней поверхности зеркала *11* для визуализации положения точки *G*, затем установить измеритель *17* таким образом, чтобы направление смещения его каретки *18* было перпендикулярно оптической оси интерферометра, и вывести оптическую ось визирного микроскопа *19* параллельно оптической оси интерферометра. Нанесение метки целесообразно выполнить на координатно-расточном станке. Контроль установки измерителя линейных перемещений можно осуществить посредством получения автоколлимационного хода лучей, вышедших из лазера *1* и отраженных от плоского зеркала с плоскопараллельной подложкой, прислоненной задней поверхностью к боковой поверхности направляющей каретки *18* (при этом объектив *5* и СГОЭ *9* должны быть выведены из схемы интерферометра). Автоколлимация достигается поворотами измерителя *17*

с помощью угловых подвижек стола 16. Контроль установки визирного микроскопа 19 осуществляется аналогично, путем получения автоколлимационного хода лучей, вышедших из лазера 1 и отраженных от плоского зеркала с плоскопараллельной подложкой, прислоненной к переднему торцу тубуса визирного микроскопа 19. При этом автоколлимация достигается поворотом микроскопа 19 его угловыми подвижками.

Для измерения параметра h необходимо предварительно установить зеркало 11 в схеме интерферометра так, чтобы его отражающая поверхность 12 заняла в пространстве положение соответствующей ей части виртуальной асферической поверхности 10. Для этого продольными и поперечными смещениями, а также угловыми наклонами зеркала 11 необходимо получить автоколлимационное изображение A'_{12} точечного источника света A , которое формируется в обратном ходе пучка, сформированного синтезированной голограммой 6 и отраженного от поверхности 12. При этом контроль ведется по наблюдаемой на экране монитора интерференционной картине, которая окаймлена интерференционной картиной в кольцевой зоне, соответствующей юстировочной голограмме 7, и смещена от ее центра симметрии (рис. 1). Когда поверхность 12 занимает в пространстве соответствующее ей положение, определяемое виртуальной асферической поверхностью 10, интерференционные полосы становятся прямыми с постоянным периодом.

Далее необходимо сориентировать направление перемещения каретки 18 параллельно прямой линии, соединяющей точки O_4 и G . Для этого смещением микроскопа 19 кареткой 18, а также его линейными подвижками необходимо вывести в его поле зрения светящуюся точку $A'_{\text{реп}}$, сфокусировать микроскоп на эту точку и совместить ее изображение с перекрестием сетки окуляра. Затем сместить визирный микроскоп кареткой к точке G и угловым поворотом стола 16 в плоскости, перпендикулярной оптической оси, а также смещением линейной каретки вывести в поле зрения микроскопа перекрестие, визуализирующее положение точки G на задней поверхности зеркала 11, и совместить его с перекрестием сетки окуляра микроскопа. После этого сместить микроскоп к точке O_4 и проверить совмещение светящейся точки $A'_{\text{реп}}$ с перекрестием сетки окуляра. В случае их несовпадения необходимо повторить описанную процедуру.

После проведения рассмотренных выше операций измеряется расстояние l от оптической оси интерферометра, с которой совпадает ось симметрии виртуальной асферической поверхности 10, до ближнего к оптической оси края зеркала 11 – до точки K , которая лежит на прямой линии, соединяющей точки O_4 и G . Для этого в поле зрения микроскопа 19 выводится светящаяся точка $A'_{\text{реп}}$ и совмещается с перекрестием сетки окуляра. После обнуления датчика линейных перемещений измерителя 17 визирный микроскоп смещается кареткой к зеркалу 11 и в его поле зрения выводится ближний к оптической оси край зеркала 11 в точке K , который затем совмещается с центром перекрестия сетки окуляра. Затем проводится отсчет показаний датчика линейных перемещений, указывающих длину отрезка l .

По данным измерения отрезка l вычисляется длина отрезка h по формуле

$$h = l + D_{\text{вз}}/2, \quad (1)$$

где $D_{\text{вз}}$ – размер внеосевого зеркала 11 в меридиональной плоскости.

Погрешность измерения отрезков l и h определяется точностью наведения визирного микроскопа 19 на светящуюся точку $A'_{\text{реп}}$ и на край зеркала 11, погрешностью датчика линейных перемещений измерителя 17, а также перекосом линии O_4G относительно направления смещения каретки 18.

Оценим погрешность измерения отрезков l и h для случая использования в измерителе 17 визирного микроскопа с $50\times$ увеличением и числовой апертурой микрообъектива 0,1, а также преобразователя перемещений типа ЛИР-10 3-го класса точности фирмы ОАО “СКБ ИС” в качестве датчика линейных перемещений. Светящаяся точка $A'_{\text{реп}}$ имеет осесимметричную дифракционную структуру с максимумом интенсивности в центре (пятно Эри). Погрешность наведения центра перекрестия сетки окуляра визирного микроскопа 19 на максимум интенсивности пятна Эри не более 1 мкм. Точность наведения центра перекрестия сетки окуляра микроскопа на край зеркала 11 составит $\pm 1,5$ мкм [12]. Для преобразователя перемещений типа ЛИР-10 3-го класса точности погрешность перемещения Δd (в микрометрах) определяется по формуле

$$\Delta d = 2,0 + 4,5L_{\text{изм}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{изм}}$ выражается в метрах [13]. Максимальная длина измерения с этим преобразовате-

лем равна 3220 мм. Погрешность Δd для такой длины на основании формулы (2) составляет 16,5 мкм. Погрешность, обусловленная перекосом прямой линии O_4G относительно направления перемещения каретки 18, определяется по формуле [12]

$$\Delta l = l(1 - \cos\varphi), \quad (3)$$

где φ – угол перекоса. При этом данная погрешность состоит из двух составляющих, одна из которых связана с неточностью настройки автоколлимации, а другая – с погрешностью нанесения визуализирующей метки на задней поверхности зеркала 11. Допустим, что расстояние от выходного окна лазера 1 до каретки 18 равно 500 мм, а диаметр выходного окна равен 3 мм, тогда угол перекоса φ в этом случае будет не более 309". А для расстояния l , равного 3220 мм, погрешность Δl , согласно формуле (3), составит не более 4 мкм. Для оценки погрешности, обусловленной перекосом из-за неточности положения визуализирующей метки, допустим, что она нанесена со смещением, равным 0,1 мм. Примем, что расстояние между точками O_4 и G равно 500 мм. В этом случае угол перекоса φ получится не более 40", а погрешность измерения Δl на длине 500 мм – не более 0,01 мкм. С увеличением длины l эта составляющая погрешности будет уменьшаться. Отсюда следует, что необходимо учитывать только составляющую погрешности, обусловленную неточностью выполнения требования автоколлимации.

Таким образом, при использовании в рассматриваемом устройстве указанного датчика линейных перемещений полная погрешность измерения отрезка l на длине до трех метров с учетом указанных выше точностей наведения визирного микроскопа 19, а также погрешности, обусловленной перекосом, составит не более 24 мкм и в каждом конкретном случае может быть уточнена с применением формул (2) и (3).

При определении отрезка h по формуле (1) вносится погрешность, обусловленная допуском на размер $D_{вз}$ внеосевого зеркала 11. Ее значение может быть уточнено, если дополнительно провести измерение реального размера $D_{вз}$ измерителем 17. В этом случае вносится погрешность наведения визирного микроскопа на края зеркала в двух диаметрально противоположных точках (точки K и E , рис. 1) около 3 мкм. Поэтому если размер $D_{вз}$ не превышает трех метров, то суммарная погрешность его измерения составляет не более 20 мкм. В связи с этим максимальная погрешность определения параметра h , когда

отрезок l и размер $D_{вз}$ не превышают каждый в отдельности трех метров, составит не более 44 мкм и в каждом конкретном случае может быть уточнена с применением формул (2) и (3).

Выше отмечалось, что голограмма 6 является голограммой-компенсатором для контроля осесимметричной асферической поверхности 10. Следовательно, она может обеспечивать и контроль формы отражающей поверхности 12 внеосевого зеркала 11. При этом посредством измерителя линейных перемещений 17 необходимо контролировать заданное положение внутреннего края (в точке K) внеосевого асферического зеркала 11 путем измерения отрезка l , а дефекты асферической поверхности оценивать по виду полос интерференционной картины для отражающей поверхности внеосевого асферического зеркала.

В схеме устройства на рис. 1 отражающая поверхность 12 внеосевого асферического зеркала 11 изображена вогнутой. Однако данное устройство пригодно для контроля параметра h и для внеосевых асферических зеркал с выпуклыми рабочими поверхностями. В этом случае синтезированная голограмма 6 должна формировать сходящийся пучок лучей, каждый луч которого распространяется по соответствующей ему нормали к выпуклой асферической поверхности.

Рассмотренная методика может найти применение при измерении параметра h для внеосевых асферических сегментов главных и вторичных зеркал телескопов. Для этого необходимо в устройстве использовать измеритель 17 с датчиком линейных перемещений, обеспечивающим измерение больших длин (до 10 метров и более). В этом случае открывается возможность реализации данной методики и при позиционировании внеосевых асферических сегментов главных и вторичных зеркал телескопов.

Рассмотренная методика использовалась при контроле параметра h входного (выпуклого с $D_{вз}$ и h , равных, соответственно, $64,2 \pm 0,1$ мм и $56,8 \pm 0,1$ мм) и выходного (вогнутого с $D_{вз}$ и h , равных, соответственно, $195,2 \pm 0,1$ мм и $190 \pm 0,1$ мм) зеркал коллиматора, описанного в работе [3], а также четырех вогнутых параболических внеосевых зеркал, параметры которых и результаты контроля представлены в таблице. Из приведенных в ней данных видно, что параметр h (внеосевой параметр параболических внеосевых зеркал) в пунктах 1 и 4 удовлетворяет заданным требованиям, а в пунктах 2 и 3 превышает заданное значение на 2 мм. На рис. 2 изображена интерференционная картина, на-

Параметры внеосевых параболических зеркал

Диаметр внеосевого зеркала $D_{вз}$, мм	Фокусное расстояние f осесимметричной параболической поверхности, мм	Заданное значение внеосевого параметра h зеркала, мм	Измеренное значение внеосевого параметра h зеркала, мм
250	2400	$510 \pm 0,2$	$509,8 \pm 0,05$
200	851	$190 \pm 0,1$	$192 \pm 0,05$
65	300	$98,5 \pm 0,1$	$100,5 \pm 0,05$
30	270	$92,8 \pm 0,1$	$92,9 \pm 0,05$

блюдаемая на экране монитора при контроле параболического внеосевого зеркала диаметром $D_{вз}$, равным 65 мм (пункт 3 таблицы). Интерферограмма в кольцевой зоне картины соответствует юстировочной автоколлимационной голограмме 7, формирующей автоколлимационное изображение A'_7 точечного источника света A (рис. 1). Интерферограмма, окаймленная интерферограммой в кольцевой зоне и расположенная в левой части картины, относится к апертуре внеосевого параболического зеркала, а светлая точка на картине сформирована голограммой 8 (рис. 1) с использованием дополнительно введенного плоского зеркала небольшого размера вблизи точки $A'_{реп}$ для имитации центра всей картины. Из интерференционной картины, соответствующей апертуре внеосевого параболического зеркала, видно, что его отражающая поверхность имеет дефекты. Однако они не помешали получить картину интерференции с регулярным ходом интерференционных полос и тем самым отъюстировать контролируемое внеосевое зеркало и провести измерение внеосевого параметра h .

Таким образом, рассмотренная методика обеспечивает контроль формы отражающих поверхностей внеосевых асферических зеркал, а также контроль весьма важного параметра внеосевых асферических зеркал – расстояния от центра их отражающих поверхностей до осей симметрии соответствующих им осесимметричных асферических поверхностей вращения. При этом погрешность контроля определяется, в основном, погрешностью датчика линейных перемещений измерителя, так как суммарная погрешность наведения визирного микроскопа на светящуюся точку-репер и края внеосевого асферического зеркала, а также от перекоса направления смещения каретки измерителя линейных перемещений относительно направления линии, соединяющей центр задней по-

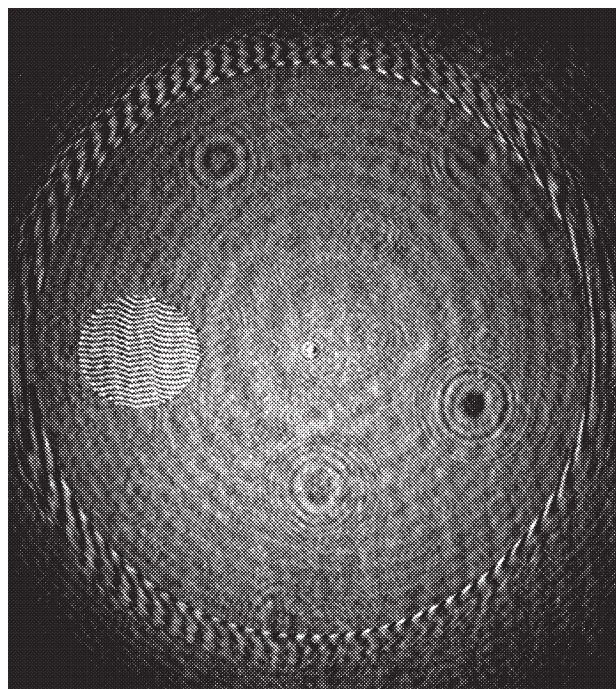


Рис. 2. Интерференционные картины, полученные при контроле параболического внеосевого зеркала с диаметром и фокусным расстоянием, равными, соответственно, 65 и 300 мм.

верхности внеосевого зеркала со светящейся точкой-репером, не превышает нескольких микрон.

Возможно использование предложенной методики для контроля указанного выше параметра и для внеосевых асферических сегментов главных и вторичных составных зеркал телескопов, а также для контроля при позиционировании этих сегментов в зеркалах телескопов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пейсахсон И.В.* Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. С. 107–109.

2. Бугаенко А.Г., Никитин Ю.П., Пантелеев Н.Л. Коллиматоры для проверки тепловизионных прицелов // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 2. С. 32–36.
3. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. С. 402–403.
4. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. С. 231–232.
5. Оптические и инфракрасные телескопы 90-х годов / Под ред. Хьюит А. Пер. с англ. / Под ред. Щеглова П.В. М.: Мир, 1983. С. 9–71.
6. Buddy M. Optics for the Giant Magellan Telescope // OPN. 2009. V. 20. № 7–8. July/August. P. 1–9. Пер. Мазуренко Ю.Т. Оптика Гигантского телескопа Магеллана // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10.
7. Горшков В.А., Папаев А.Ю., Подобранный А.В. Автоматизированное формообразование высокоточных асферических поверхностей // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 12. С. 5–10.
8. Чекаль В.Н., Чудаков Ю.И., Шевцов С.Е. Применение координатно-измерительных машин для оптимизации технологии автоматизированного формообразования оптических поверхностей // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 11. С. 82–87.
9. Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мирнова Т.А., Нюшкин А.А., Протасевич Д.В., Рафииков Р.А. Синтезированная голограммная оптика // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 12. С. 23–32.
10. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафииков Р.А. Способ настройки устройства для контроля оптических поверхностей // А. с. № 729437. Бюл. изобр. 1980. № 15; преобразовано в патент РФ № 729437. 1994.
11. Larionov N.P., Lukin A.V., Nushkin A.A., Protasovich D.V. Laser and Holographic Method for Testing Aspheric Optical Elements and Centered Aspheric Optical Systems // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. P. 685–690.
12. Афанасьев В.А. Оптические измерения: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1981. С. 21–25.
13. www.skbis.ru.