

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.4: 681.7.02-04:681.787

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЦЕНТРИРОВКИ АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА АСТРОНОМИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

© 2015 г. А. П. Семенов, канд. техн. наук

Лыткаринский завод оптического стекла, г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

Описан способ определения децентрировки асферической поверхности относительно геометрического центра астрономического зеркала с помощью линейного трёхточечного сферометра, используемого также и для определения отклонений профиля шлифованной поверхности от заданного, приведены примеры успешного использования способа.

Ключевые слова: оптика телескопа, обработка оптики, контроль оптики, асферическое зеркало, измерения сферометром, децентрировка зеркала.

Коды OCIS: 220.0220; 220.0230; 220.4610; 350.1260

Поступила в редакцию 25.09.2014

Введение

Задача измерения смещения оптической оси (смещение вершины асферической поверхности) относительно геометрического центра изготавливаемого крупногабаритного астрономического зеркала является в настоящее время весьма актуальной, поскольку практически во всех чертежах крупногабаритных зеркал задаётся значение допустимого смещения. Это связано прежде всего со сложностью юстировки оптики современных телескопов, которые стали короткофокусными и высокоапертурными и, соответственно, с большим угловым полем, поэтому значительное смещение оптической оси может привести к смещению точки центра масс зеркала и к серьёзным сложностям при юстировке телескопа.

Известны способы центрировки оптических элементов, например, для оптики диаметром до 100 мм, где задача определения подобных смещений решается путём её юстировки в центрировочном приспособлении с использованием оптической системы для выполнения данной процедуры. Для крупногабаритной оптики диаметром 1 м и более использование такого способа сопряжено с большими сложностями. Появ-

ляется потребность в станках с вращающимся столом диаметром, превышающим размер детали, с биением и центрировкой в сотые доли миллиметра, кроме того, необходима оптическая система, расположенная на оси зеркала, позволяющая проверять соосность элементов оптической системы с осью исследуемого зеркала.

В статье описан механический метод измерения децентрировки, основанный на способе определения относительных изменений показаний линейного трёхточечного сферометра при измерении стрелок прогиба вдоль радиального направления на детали в различных сечениях при помещении сферометра на одинаковом расстоянии от края детали. В этом случае разница в показаниях сферометра в двух взаимно противоположных направлениях позволяет определить смещение оптической оси. Точность способа определяется чувствительностью сферометра и асферичностью поверхности. Чем выше асферичность поверхности, тем меньшее смещение оптической оси можно определить данным способом.

Для выполнения измерений был разработан и изготовлен специальный линейный трёхточечный сферометр с упорами, фиксирующими положение сферометра относительно боковой

цилиндрической поверхности, который устанавливается на поверхности детали в направлении от края к центру.

Для экспериментальной проверки пригодности способа были выполнены измерения смещения оптической оси на асферических деталях различного диаметра и асферичности. Наиболее показательные из них – измерения, выполненные на главном зеркале телескопа VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) [1, 2] Европейской южной обсерватории диаметром 4100 мм с асферичностью около 850 мкм и на главном зеркале телескопа TNT (*Thai National Telescope*) [3] диаметром 2400 мм с асферичностью около 160 мкм (по контракту с фирмой EOS Technology). Это зеркала, изготовленные в ОАО ЛЗСО, на которых было определено смещение оптической оси и, таким образом, подтверждена пригодность метода.

Способ определения положения вершины оптической оси с использованием специальной оптической оснастки

Для точной настройки и определения положения оптической оси зеркала требуется знать положение зеркала относительно некоторых фиксированных базовых точек. Оптическая ось зеркала формируется в процессе асферизации оптической детали методом шлифования и последующего полирования. Геометрические параметры самой заготовки, точность изготовления образующей оптической детали (овальность, цилиндричность) также могут оказывать влияние на точность определения смещения.

При контроле оптических деталей с асферическими поверхностями применяют механический и оптический методы измерения. Среди оптических методов известен интерференционный способ измерения децентрировки. Способ заключается в наложении на измеряемую асферическую поверхность детали сферического пробного стекла, которое самоустанавливается на измеряемой поверхности, в воздушном промежуток между ними возникает кольцевая интерференционная картина. Децентрировку поверхности определяют по смещению центра колец относительно центра поперечного сечения цилиндрической поверхности детали. Способ позволяет измерять смещение вершины поверхности относительно геометрической оси детали. Погрешность измерения децентрировки вер-

шины различных типов асферических поверхностей не более 5 мкм. К крупногабаритным астрономическим зеркалам такой метод неприменим, поскольку пробное стекло имеет очень малые размеры по сравнению с диаметром зеркала, что ведёт к потере необходимой точности измерений, кроме того, как правило, главные зеркала телескопов имеют центральное отверстие, что делает использование пробного стекла при вершине зеркала вообще невозможным.

Известен оптический автоколлимационный способ измерения децентрировки оптических одиночных и склеенных линз в оправках, который можно адаптировать и к измерению децентрировок асферической поверхности зеркала. Он основан на использовании приборов, построенных по схеме автоколлимационной трубки. Объектив прибора формирует изображение перекрестия в плоскости, где расположен центр кривизны верхней поверхности измеряемой линзы. При вращении линзы, если она децентрирована, автоколлимационное изображение центра перекрестия на измерительной сетке прибора опишет окружность с определённым радиусом. По нему судят о децентрировке линзы. Но в этом случае оптическая система (вращающийся стол – оправка зеркала – зеркало – корректор асферического волнового фронта – вспомогательная оптика) не должна иметь биений и наклонов и собственных смещений элементов с оптической оси, что невозможно достичь на практике в случае крупногабаритных астрономических зеркал.

Изготовленное главное зеркало телескопа VISTA имеет гиперболическую поверхность диаметром 4100 мм (вершинный радиус 8094 мм, коническая константа равна $-1,129792$) с отверстием 1200 мм. При этом оптическая ось должна иметь децентрировку не более 1 мм. Наклон оптической оси не столь существенно влияет на оптическое качество зеркала (наклон оси главного зеркала может быть скомпенсирован наклоном вторичного зеркала), а вот смещение оптической оси относительно вершины зеркала вносит более заметные искажения в отражённый волновой фронт.

Оптический метод измерений, который предлагался для данных измерений, заключается в следующем. Форма поверхности зеркала контролируется с помощью корректора волнового фронта (1, рис. 1), который преобразует плоский волновой фронт в асферический. Асферический волновой фронт, отражённый от контролируемой поверхности 2, снова прохо-

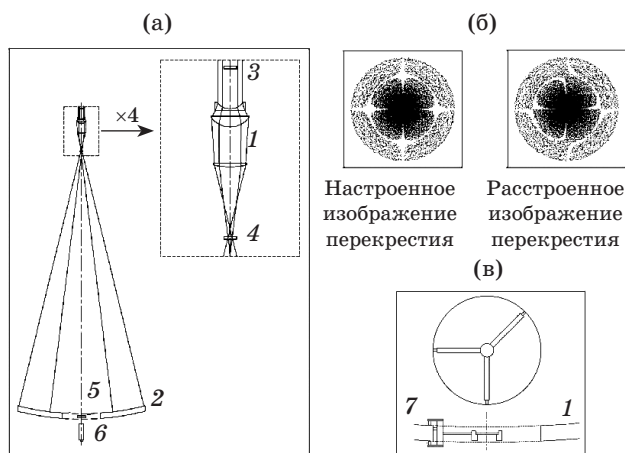


Рис. 1. Предлагаемая первоначальная оптическая схема измерения смещения оптической оси зеркала телескопа VISTA. Схема контроля смещения оптической оси (а), предполагаемый вид изображения перекрестия в микроскопе (б), предполагаемый способ размещения и юстировки пластины с перекрестием в отверстии зеркала (в).

дит через корректор и интерферирует с эталонным плоским волновым фронтом. При настройке интерферометра на малое количество полос он располагается на оптической оси зеркала. Перед корректором находится отражающая двухсторонняя пластина 3, после корректора – пластина с перекрестием 4. В отверстие детали также помещается пластина с перекрестием 5, за которой установлен автоколлимационный микроскоп 6. По данной оптической схеме и измеряются смещения оптической оси.

Настраивается интерферометр с корректором волнового фронта на зеркало как обычно. В параллельный пучок перед корректором помещается пластина 3, входящая в объектив корректора. Настройкой интерферометра (наклоны/касания) добиваются соосности этой пластины с осью корректора с помощью интерферометра. Размещаем пластину с перекрестием 4 в промежуточном фокусе. Юстируем положение перекрестия, пока оно не будет настроено на оптическую ось. Убираем корректор 1. В автоколлиматор, расположенный в отверстии зеркала, наблюдаем два перекрестия. Настроив автоколлиматор (наклон и центрирование) на эти перекрестия, получим, что ось автоколлиматора совпадает с оптической осью зеркала. Размещаем пластину с перекрестием в центральное отверстие зеркала и выставляем его в соответствии с геометрией зеркала. Измеряем отклонения между автоколлиматором

и данным перекрестием. Это является прямым измерением смещения оси.

Так как промежуточный фокус линзы корректора имеет значительные сферические аберрации, перекрестие в промежуточном фокусе создаёт изображения, подобные тем, которые приведены на рис. 1б (характеристики теста наподобие ножа Фуко).

Значительная сферическая аберрация требует точности юстировки перекрестия менее $\pm 0,1$ мм. Перед автоколлиматором, настроенным на оптическую ось корректора волнового фронта и установленным в отверстии, размещается пластина с перекрестием 5, которая настраивается на ось автоколлимационного микроскопа. Это перекрестие даёт положение оптической оси, т.е., как бы визуализируется оптическая ось. Далее необходимо измерить расстояние до этой точки от геометрического центра детали, в данном случае – от боковой поверхности центрального отверстия.

В этом случае центральное отверстие должно иметь погрешности изготовления меньшие, чем измеряемые погрешности смещения. На рис. 1в представлена схема размещения пластины с перекрестием в центральном отверстии. Устройство юстируется на координатной машине. Анализ показывает, что теоретически такой способ позволяет определить оптическую ось. Однако при его технической реализации возникает целый ряд существенных проблем.

В конструкции интерферометра нет места, где можно было бы разместить пластину 3. Размещение пластины 4 в промежуточном фокусе с точностью 0,1 мм также выглядит проблематичным, так как промежуточный фокус имеет каустику размером порядка 30 мм. Убрать корректор не представляется возможным по причине невозможности установки в рамках стенда контроля приспособлений, необходимых для фиксации пластин 3 и 4. Кроме того, контрольная площадка, на которой располагается корректор, не является абсолютно жёсткой, и при устранении корректора возникнут деформации площадки и, как следствие, смещение пластин 3 и 4. Зеркало в процессе обработки и контроля обычно располагается либо на мембранно-технологической оправе, либо на механической системе разгрузки зеркала, и разместить там автоколлиматор не представляется возможным. Размещение пластины 4 по отношению к отверстию с точностью 0,1 мм также выглядит проблематично, так как для обеспечения такой точности

потребуется достаточно жёсткая (массивная) конструкция, и, кроме того, данная конструкция должна будет занять пространство в отверстии зеркала, ранее занятое автоколлиматором.

Из всего сказанного выше можно заключить: предложенный способ, без сомнения, является достаточным для проведения требуемых измерений, но его техническая реализация невозможна. Таким образом, необходим другой способ для решения задачи определения смещения оптической оси относительно механического центра.

Теория метода

Известен механический метод измерения децентрировки асферических поверхностей, который реализуется следующим способом. Из теории следует, что децентрированная линза обладает разнотолщинностью Δd по краю и клиновидностью, поэтому может быть представлена как совокупность центрированной линзы и клина с углом $\theta = \Delta d/D$, где D – диаметр линзы. В данном способе используют индикаторный контактный косиномер, которым измеряют толщины d_1 и d_2 диаметрально противоположных краёв линзы по нескольким сечениям и вычисляют разнотолщинность $\Delta d = d_1 - d_2$, а затем её функцию – смещение вершины поверхности, т.е. децентрировку. Способ применим только для контроля линз (деталей) диаметром до 200 мм и не решает поставленную задачу.

Крупногабаритные астрономические зеркала всегда имеют разнотолщинность, и задача максимально устранить её не ставится. Проблема заключается только в том, чтобы в пределах допуска совместить оптическую вершину зеркала с его механическим центром, определяемым по внешней боковой поверхности зеркала. Для измерений используется линейный трёхточечный сферометр. Его последовательно помещают вдоль радиального направления на ра-

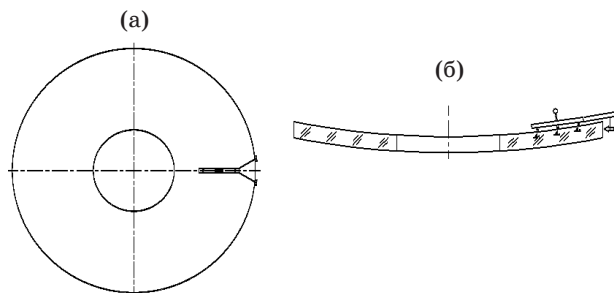


Рис. 2. Расположение сферометра на детали, вид сверху (а) и сбоку (б).

бочей поверхности на одинаковом расстоянии от боковой поверхности в различных направлениях от центра детали. Затем по относительной разности в измеренных значениях стрелки прогиба во взаимно противоположных направлениях определяют смещение оптической оси относительно геометрического центра оптической детали (рис. 2).

Уравнение асферической (конической) поверхности представляется в следующем виде:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{R + \text{sign}R\sqrt{R^2 - (1 + K)(x^2 + y^2)}} + \text{aspheric},$$

$$\text{aspheric} = \left\{ \sum_{1 \leq p \leq 4} A_p (x^2 + y^2)^p \right\} + \left\{ \sum_{1 \leq m+n \leq 10} C_{m,n} x^m y^n \right\},$$

где x, y, z – координаты любой точки на поверхности оптической детали, центр системы координат находится в вершине зеркала, R – вершинный радиус кривизны зеркала, K – коническая константа ($K = -e^2$, e – эксцентриситет конической поверхности), A_p – коэффициенты асферической поверхности высшего порядка, $C_{m,n}$ – коэффициенты полинома в декартовой системе координат x, y , $C_{00} = R$.

Уравнение без дополнительных коэффициентов высшего порядка (*aspheric*) описывает асферические поверхности 2-го порядка, наиболее распространённые в оптике.

Уравнение асферической поверхности, наиболее употребляемое в современной асферической оптике, можно также представить как

$$z = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2S^2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10}, \quad (1)$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты асферических поверхностей более высокого порядка (выше 2-го), $S^2 = x^2 + y^2$, $c = 1/R$.

В зависимости от значения конической константы различают следующие формы поверхности: если $K < -1$, то гиперboloид, $K = -1$ – параболоид, $-1 < K < 0$ – эллипсоид вращения относительно главной оси, $K = 0$ – сфера, $K > 1$ – эллипсоид вращения относительно малой оси (сплюснутый сфероид).

На рис. 3 изображено сечение x, z асферической поверхности, где z – оптическая ось. Опре-

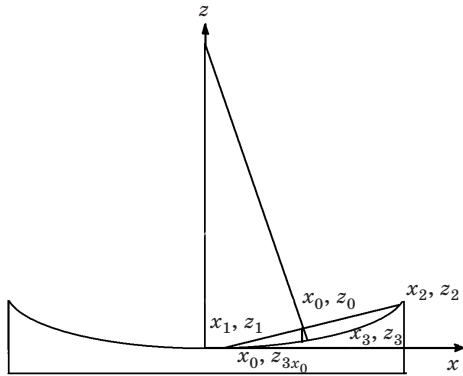


Рис. 3. К расчёту стрелки прогиба, измеряемой сферометром.

делим стрелку прогиба dl , когда сферометр установлен вдоль радиального направления на детали в точках x_1, z_1 (первая ножка сферометра) и x_2, z_2 (вторая ножка сферометра). База сферометра – L . Следовательно, в данном случае необходимо найти координаты точки x_0, z_0 , затем координаты точки x_3, z_3 и определить отрезок dl как расстояние от точки x_0, z_0 до точки x_3, z_3 . Но сначала надо определить координаты точки x_2, z_2 , которая находится на расстоянии L от точки x_1, z_1 . Таким образом, используя уравнение (1), имеем следующую систему уравнений для сечения асферической поверхности высшего порядка для поиска координат точки x_2, z_2 :

$$z_2 = \frac{cx_2^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2x_2^2}} + A_1x_2^4 + A_2x_2^6 + A_3x_2^8 + A_4x_2^{10}, \quad (2)$$

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2},$$

Определяем координаты второй точки x_2, z_2 . Вычисляем координаты средней точки (x_0, z_0)

$$x_0 = (x_1 + x_2)/2, \quad z_0 = (z_1 + z_2)/2.$$

Через точку x_0, z_0 проходит нормаль, пересекающая поверхность. Расстояние от точки x_0, z_0 до поверхности (x_3, z_3) и есть искомая стрелка прогиба. Её длину можно с достаточной степенью точности определить следующим образом:

$$dl = dl' \cos \varphi,$$

$$dl' = \left[(x_0 - x_3)^2 - (z_0 - z_{3x_0})^2 \right]^{1/2},$$

$$\cos \varphi = (x_2 - x_1)/L,$$

$$z_{3x_0} = \frac{cx_0^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2x_0^2}} + A_1x_0^4 + A_2x_0^6 + A_3x_0^8 + A_4x_0^{10}.$$

Таким образом, вычислив длину стрелки прогиба при смещении сферометра вдоль радиального направления (радиальное направление – по линии от центра детали к краю) можно определить точность полученных измерений, т.е. насколько изменятся показания сферометра при продольном смещении на 1, 2, 3... мм. Причём сама длина стрелки прогиба не важна, поскольку имеет значение только её относительное изменение при радиальном смещении.

Если при радиальном смещении сферометра на размер допустимого по спецификации смещения оптической оси показания сферометра изменятся в пределах его чувствительности, то тогда можно измерить смещение оптической оси. Например, асферическая поверхность смещена на 1 мм относительно механического центра детали, а показания сферометра при смещении его на 1 мм на данном расстоянии от боковой поверхности меняются на 0,75 мкм, тогда если вдоль радиального направления на одном краю детали (положение 0°) обнулить показания сферометра (0 мкм), то с противоположной стороны детали при положении сферометра на таком же расстоянии от боковой поверхности детали оно составит +1,5 мкм (положение 180°).

Конструкция сферометра для измерений

Для реализации предложенного способа был сконструирован и изготовлен специальный сферометр на базе линейного трёхточечного прибора (рис. 4).

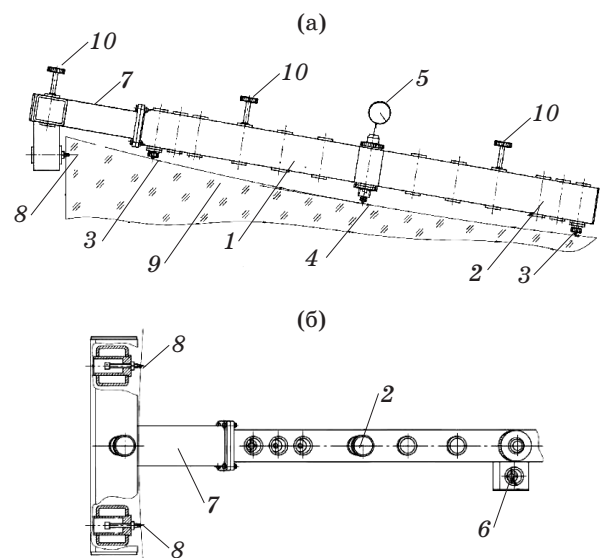


Рис. 4. Вид сферометра сбоку (а) и сверху (б).

Сферометр состоит из полого металлического корпуса 1, имеющего форму параллелепипеда, с несколькими сквозными вертикальными отверстиями 2. В крайних отверстиях размещены две опорные ножки 3, а в центральном отверстии – измерительная ножка 4 с центральным микронным индикатором 5. В центральной части на корпусе закреплён боковой упор 6 – регулируемая по высоте ножка, необходимая для устойчивости сферометра и установки трёх измерительных опор строго в вертикальной плоскости. На одном из торцов корпуса закреплён кронштейн 7, в нижней части которого установлены два горизонтальных регулируемых упора 8, необходимых для фиксации сферометра на боковой поверхности измеряемой детали 9. Для установки сферометра на деталь на корпусе сверху предусмотрены три ручки 10. Опорные ножки можно устанавливать в резервных вертикальных отверстиях 2 и таким образом менять базу сферометра в зависимости от диаметра детали. Желательная база – в пределах от 600 до 1000 мм.

Практические результаты измерений

Предложенный способ и сферометр были применены на практике, они позволили простым путём измерять с заданной точностью децентрировку асферической поверхности зеркал телескопов, в том числе у зеркал с центральным отверстием.

Способ реализуется следующим образом. Для измерений используют линейный трёхточечный сферометр с базой, примерно равной расстоянию от края детали до центра или до центрального отверстия (если деталь с отверстием), но не более 1000 мм, чтобы избежать ошибок, вызванных собственными деформациями сферометра. Овальность и конусность боковой цилиндрической поверхности зеркала, как правило, не превышают 0,1 мм. Чувствительность измерительной головки сферометра составляет обычно 1 мкм или даже 0,2 мкм. Сферометр размещают вдоль радиального направления от края детали к центру. Положение сферометра относительно края фиксируется на боковой поверхности зеркала двумя упорами с точностью менее 0,1 мм (рис. 5).

Расчётное значение изменения стрелки прогиба при смещении сферометра в радиальном направлении вдоль кривой, описывающей контролируемую поверхность зеркала, например,

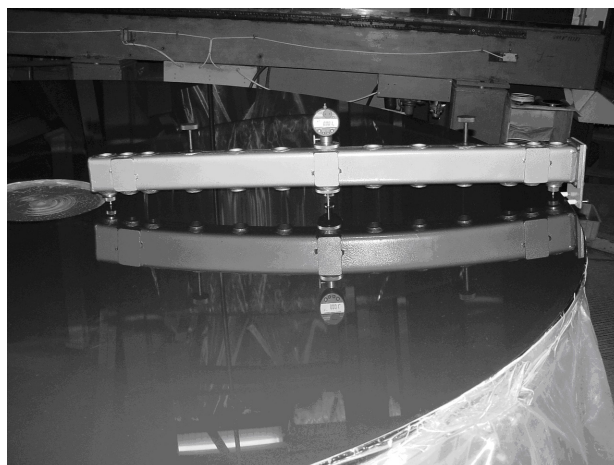


Рис. 5. Сферометр на поверхности оптической детали при измерениях.

Таблица 1. Расчётные показания стрелки прогиба (сферометр обнуляется на вспомогательной сферической поверхности) при помещении ножек линейного сферометра в точки с координатами x_1, z_1 и x_2, z_2

| x_1 , мм | z_1 , мм | x_2 , мм | z_2 , мм | S_c , мкм |
|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 197,98 | 2,72 | 1193,34 | 98,88 | 243,74 |
| 198,98 | 2,75 | 1194,33 | 99,05 | 244,43 |
| 199,97 | 2,78 | 1195,31 | 99,21 | 245,12 |
| 200,97 | 2,80 | 1196,30 | 99,38 | 245,81 |
| 201,97 | 2,83 | 1197,29 | 99,54 | 246,50 |
| 202,97 | 2,86 | 1198,27 | 99,70 | 247,19 |
| 203,97 | 2,89 | 1199,26 | 99,87 | 247,88 |

Примечание. Диаметр зеркала 2400 мм, вершинный радиус 7200 мм, эксцентриситет 1,0134, диаметр отверстия 330 мм, максимальная асферичность от ближайшей сферы 168 мкм, база сферометра 1000 мм.

на 1 мм вычисляется по уравнению поверхности с учётом заданной базы сферометра.

В табл. 1 представлены результаты расчётов стрелки прогиба главного зеркала телескопа TNT диаметром 2400 мм. Здесь x_1, z_1 и x_2, z_2 – координаты крайних ножек сферометра в мм, S_c – длина стрелки прогиба в средней точке при отклонении от эталонной сферической поверхности близкого радиуса кривизны (какой именно, не имеет значения) в мкм. В таблице приведены измеренные значения в крайней области детали с шагом 1 мм. Из неё видно, что при смещении сферометра на 1 мм значения стрелки прогиба меняются на 0,7 мкм, что можно зафиксировать индикаторами сферометра.

Таким образом, если асферическая поверхность смещена на 2 мм (требования спецификации) относительно механического центра

детали, то при установке сферометра в радиальном направлении, соответствующем смещению оптической оси (положение 0°), и его обнулению (0 мкм) с противоположной стороны получим отклонение в 3 мкм. В результате точность измерения смещения вершины асферической поверхности при выбранной базе сферометра получена не менее 1 мм. При погрешности измерительной головки сферометра 0,2 мкм может быть получена погрешность измерений не более 0,5 мм.

Проведя измерения по кругу в нескольких радиальных положениях (8–12 положений) на одинаковом расстоянии от края детали, получим смещённую относительно центра замкнутую кривую, указывающую направление и размер продольного смещения оптической оси.

Форма поверхности зеркала была доведена до требований чертежа, размах отклонений волнового фронта составляет $0,316\lambda$ (длина волны $\lambda = 0,6328$ мкм), что соответствует отклонениям на поверхности от заданной формы в 0,1 мкм. При таких отклонениях поверхности они никак не повлияют на результат определения смещения оптической оси. Отклонения не превышают значения 1,5 мкм. Отсюда следует, что смещение оптической оси относительно геометрической не превышает 1 мм. На рис. 6 представлена диаграмма, показывающая направление и размер смещения оптической оси.

У зеркала VISTA смещение вершины оптической оси относительно механического центра должно быть менее 1 мм. База сферометра – 1020 мм. Значения показаний сферометра при смещении его на 1 мм вдоль радиально-

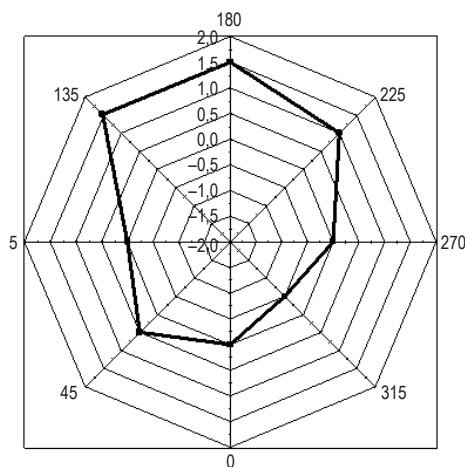


Рис. 6. Диаграмма углового распределения относительных показаний сферометра.

го направления (направление x) представлены в табл. 2. Таким образом, если асферическая поверхность смещена на 1 мм относительно механического центра детали, то показания сферометра будут меняться в диапазоне ± 1 мкм. В результате точность измерения смещения вершины асферической поверхности данным способом при выбранной базе сферометра – не менее 0,5 мм. При погрешности измерений головки сферометра 0,2 мкм может быть получена погрешность измерения не более 0,1 мм. При этом собственные локальные отклонения на поверхности детали должны быть менее 0,5 мкм.

Проведя измерения в нескольких радиальных положениях (6 положений, табл. 3) на одинаковом расстоянии от края детали, получили максимальное отклонение 2 мкм, это означает, что продольное смещение оптической оси относительно механического центра детали не превышает 1 мм.

В результате можно сформулировать необходимые условия использования данного спо-

Таблица 2. Расчётные показания стрелки прогиба при помещении ножек линейного сферометра в точки с координатами x_1 , z_1 и x_2 , z_2

| x_1 , мм | z_1 , мм | x_2 , мм | z_2 , мм | S_e , мкм |
|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 620,41 | 23,77 | 1630,72 | 164,06 | 366,45 |
| 621,41 | 23,85 | 1631,70 | 164,25 | 367,33 |
| 735,02 | 33,37 | 1743,32 | 187,46 | 471,57 |
| 736,02 | 33,46 | 1744,30 | 187,67 | 472,52 |
| 895,23 | 49,49 | 1900,42 | 222,71 | 632,94 |
| 896,23 | 49,60 | 1901,39 | 222,93 | 633,99 |
| 1046,18 | 67,57 | 2048,13 | 258,60 | 799,55 |
| 1047,17 | 67,70 | 2049,10 | 258,84 | 800,69 |

Примечание. Диаметр зеркала VISTA 4100 мм, вершинный радиус 8094 мм, эксцентриситет 1,129792, диаметр отверстия 1200 мм, максимальная асферичность от ближайшей сферы 881 мкм, база сферометра 1020 мм.

Таблица 3. Относительные показания сферометра при измерениях стрелки прогиба зеркала VISTA в 6 радиальных положениях от центра (в первом положении сферометр обнуляется)

| № положения | Измеренные отклонения, мкм |
|-------------|----------------------------|
| 1 | 0 |
| 2 | +1 |
| 3 | 0 |
| 4 | +1 |
| 5 | +2 |
| 6 | 0 |

соба измерения смещения оптической оси относительно механического центра детали:

- боковая поверхность детали, на которую опирается сферометр, должна иметь овальность и конусность намного меньшие, чем требуемое значение смещения оптической оси относительно механической;

- собственные ошибки формы поверхности детали не должны превышать погрешность сферометра, чтобы они не сказывались на результатах измерений, а при большом количестве измеряемых сечений влияние локальных ошибок поверхности можно усреднить и исключить;

- в процессе измерений необходимо с максимальной возможной точностью сохранять направление измерений, для чего сферометр базируется на боковой поверхности детали с помощью боковых упоров с точностью менее 0,1 мм;

- наклон сферометра к детали должен быть неизменным в процессе измерений, он регулируется четвёртой, вспомогательной, ножкой сферометра;

- база сферометра должна быть максимально возможной для данной измеряемой детали, поскольку это повышает точность измерений;

- способ позволяет определить заданное по техническим условиям смещение оптической оси, когда при перемещении сферометра на данное значение в радиальном направлении чувствительности сферометра достаточно для фиксирования данного смещения;

- зеркало во время проведения измерения должно находиться в разгруженном состоянии, либо на технологической разгрузке, либо на штатной разгрузке, так же как в процессе контроля формы поверхности зеркала.

В настоящее время всё более усложняются требования к изготавливаемой астрономической оптике, растёт апертура зеркал, увеличивается их асферичность. Эти изменения касаются как главных зеркал с вогнутой поверх-

ностью, так и вторичных зеркал с выпуклой поверхностью. В качестве примера представлены результаты расчета изменений стрелки прогиба при продольном смещении сферометра вдоль радиального направления на такой поверхности.

Параметры детали следующие: диаметр детали 1240 мм, вершинный радиус 7236 мм, эксцентриситет 67,3812, максимальная асферичность от ближайшей сферы 600 мкм. При смещении сферометра на 1 мм стрелка прогиба меняется почти на 4 мкм(!), что можно зафиксировать индикаторами сферометра без особого труда. Отсюда видно, что поскольку легко зафиксировать изменения стрелки прогиба в 1 мкм, то можно измерить смещение оптической оси относительно механической в 0,25 мм (!).

Заключение

Механический метод измерения децентрировки крупногабаритного астрономического зеркала, основанный на способе определения относительных изменений показаний линейного трёхточечного сферометра при измерении стрелок прогиба вдоль радиального направления на детали в различных сечениях при помещении сферометра на одинаковом расстоянии от края детали, прошёл экспериментальную проверку. В этом случае разница в показаниях сферометра в двух взаимно противоположных направлениях позволяет определить смещение оптической оси. Точность метода определяется чувствительностью сферометра и асферичностью поверхности. Чем выше асферичность поверхности, тем меньшее смещение оптической оси можно определить представленным методом.

Определено смещение оптической оси относительно механического центра детали главных зеркал телескопов TNT и VISTA и показано, что смещение менее 1 мм.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A., Atad-Ettengui E., Egan I., Bennet R.J., Craig S.C. M1 and M2 mirrors manufacturing for VISTA telescope // Proc. SPIE. 2004. V. 5494. P. 374–381.
2. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Semenov A.P., Patrikeev V.E., Ignatov A.N., Polyanchikov A.V., Pridnya V.V., Sharov Y.A., Poleschchuk A.G., Nasyrov R.K. M1 primary mirror manufacturing for VISTA project // Proc. SPIE. 2008. V. 7018. P. 701804-1–701804-10.
3. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P. Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors // Proc. SPIE. 2010. V. 7739. P. 77390P-1–77390P-10.