РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 681.7.062.4: 520.2.062

МЕТОД ГАРТМАНА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ВЫПУКЛЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ КРУПНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

© 2007 г. **В. В. Дружин**; **Д. Т. Пуряев**, доктор техн. наук

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: vldruzhin@hotmail.com, puryaev@mx.bmstu.ru

Рассмотрена возможность применения метода Гартмана для контроля формы выпуклых асферических зеркал телескопов в производственных условиях. Диафрагма Гартмана в виде регулярных отверстий малого диаметра в непрозрачном экране расположена вне контролируемого зеркала и освещается пучком параллельных лучей, направленных перпендикулярно оси симметрии зеркала. В роли регистрирующего устройства может использоваться линейка ПЗС или фотопластинка, на чувствительной поверхности которой регистрируется так называемая гартманограмма. Дальнейшая математическая обработка позволяет сделать заключение о погрешностях формы меридионального сечения. Для обеспечения контроля всей поверхности последняя поворачивается вокруг оси симметрии на любой заданный угол и любое количество раз, что дает возможность полностью автоматизировать процесс контроля в производственных условиях как шлифованных, так и полированных поверхностей.

Коды OCIS: 220.4840, 350.1260, 120.6650, 220.1250.

Поступила в редакцию 02.04.2007.

Введение

В последнее время астрономия испытывает бурное развитие, в связи с чем возрастает интерес к выпуклым асферическим зеркалам больших световых диаметров, являющихся частью крупных, а иногда даже гигантских телескопов. Возможность изготовления таких зеркал с требуемой точностью определяется возможностью их контроля.

Традиционный контроль формы выпуклых зеркал проводится с помощью эталонных поверхностей, например, сферических зеркал [1], а также с помощью контактных методов с применением калибров, шаблонов, пробных стекол и других вспомогательных элементов. В работе [2] предложен метод контроля с помощью экранов, которые рассчитываются индивидуально для каждой контролируемой поверхности.

Основные недостатки таких методов заключаются в том, что они сложны, требуют изготовления высокоточных эталонных деталей. Кроме того, они имеют ограниченную область применения.

Описание метода

Схема предложенного метода бесконтактного контроля формы выпуклых асферических поверхностей показана на рис. 1. На асферическую поверхность выпуклого зеркала *4*, подлежащего исследованию, с помощью коллимирующего устройства *1* направляется пучок параллельных лучей, ограниченный непрозрачной диафрагмой *2* с линейным расположением круглых отверстий, причем поверхность *4* ориентируют таким образом, чтобы ее ось симметрии была перпендикулярна пучку параллельных лучей, падающих на поверхность.

Лучи, проходящие через отверстия диафрагмы, попадают на контролируемую поверхность и, отражаясь, попадают в плоскость *3*, образуя гартманограмму в виде ряда пятен эллиптической формы.

Измерив на гартманограмме координаты точек центров пятен, на основании известных геометри-

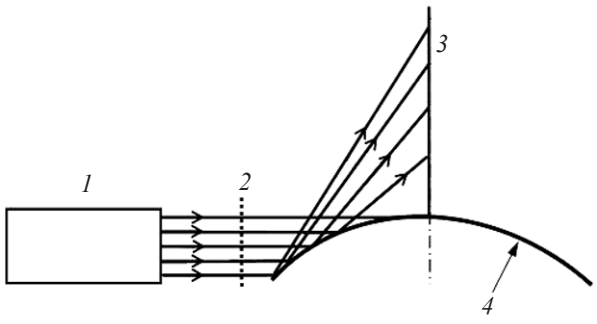


Рис. 1. Схема контроля выпуклой поверхности (пояснения в тексте).

ческих параметров схемы можно определить отклонение формы исследуемой поверхности от теоретического вида.

Теоретические основы метода

В астрономической оптике из асферических поверхностей наиболее распространены поверхности вращения II порядка. Поэтому целесообразно провести исследование, направленное на контроль поверхностей этого типа.

Расположим прямоугольную систему координат *YOZ* так, чтобы ее центр был совмещен с вершиной асферической поверхности, а ось *Z* совпадала с осью симметрии поверхности (рис. 2)

Меридиональная кривая поверхности вращения второго порядка описывается уравнением

$$y^2 = 2r_0 z - (k+1)z^2, \qquad (1)$$

где $k = -e^2$ – коническая константа, e – эксцентриситет, r_0 – радиус кривизны при вершине асферической поверхности. Положение луча, отраженного от точки $M(y, z)$ поверхности, определяется из соотношения

$$h = y\mathrm{tg}2\varphi - z, \qquad (2)$$

где φ – угол между нормалью к поверхности в точке M и осью OZ, причем

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{\sqrt{2r_0 z - (k+1)z^2}}{r_0 - (k+1)z}. \qquad (3)$$

Используя выражения (1)–(3), определим положение отраженного луча h как функцию от параметров k, z:

$$h = z\frac{k(k+1)z^2 - 2r_0(1+2k)z + 3r_0^2}{\left(2+3k+k^2\right)z^2 - 2r_0(2+k)z + r_0^2}. \qquad (4)$$

При контроле реальных поверхностей характер их зональных ошибок не известен, поэтому введем

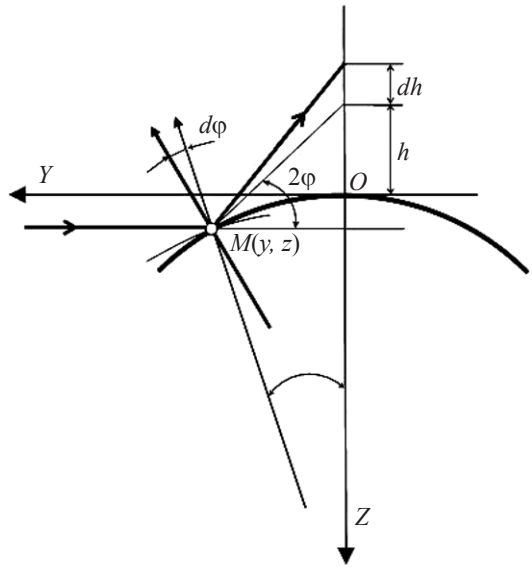


Рис. 2. Схема хода лучей в случае отклонения поверхности от теоретической формы (пояснения в тексте).

следующие допущения: будем считать, что в контрольных точках происходит поворот нормалей вокруг точек встречи лучей с теоретической поверхностью, а изменение формы происходит в силу изменения эксцентриситета заданной поверхности.

Как показано на рис. 2, поворот нормали на угол $d\varphi$ вызовет смещение центра пятна на dh. Найдем связь между этим смещением и параметрами контролируемой поверхности.

Решая уравнение (3) относительно k и отбрасывая лишний корень с учетом областей определения параметров z, r и φ, получим

$$k = \frac{2\left(r_0 - z\right) - z + \sqrt{z\left(z + 4r_0\mathrm{tg}^2\varphi\right)}c\mathrm{tg}^2\varphi}{2z}. \qquad (5)$$

Используя полученные формулы, выразим tgφ через h и z:

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{\sqrt{h^2 + hz + 2rz - \sqrt{z\left(4h^2 r + (h+2r)^2 z + 2hz^2 + z^3\right.}}}{(h+z)^2}. \qquad (6)$$

Продифференцировав выражение (6), найдем зависимость изменения угла нормали от смещения dh:

$$d\varphi = \frac{(A - 2rz)(A + z(h - 2r + z)}{2A\sqrt{h^2 + hz + 2rz - A}\left(2h^2 + 3hz + z(2r+z) - A\right)}dh, \qquad (7)$$

где

$$A = \sqrt{z\left(4h^2 r + (h+2r)^2 z + 2hz^2 + z^3\right)}.$$

В результате по формуле (7) можно определить поворот нормали поверхности.

Для описания характера контролируемой поверхности определим ее отклонение от теоретической формы. Для этого воспользуемся известной формулой вычисления отклонения асферической поверхности от вершинной сферы [3]

$$N_0 = \int_0^{\varphi} \delta S_n \sin\varphi d\varphi, \qquad (8)$$

где δS_n – продольная аберрация нормали.

Изменение отклонения от вершинной сферы dN_0 в случае изменения угла нормали поверхности

$$dN_0 = \delta S_n \sin\varphi d\varphi. \qquad (9)$$

Для асферической поверхности второго порядка значение δS_n вычисляется по формуле

$$\delta S_n = \frac{kr_0}{k+1}\left[\frac{1}{\sqrt{1+(k+1)\operatorname{tg}^2\varphi}} - 1\right]. \qquad (10)$$

Для параболической поверхности формула (10) принимает вид

$$\delta S_n = \frac{r_0}{2}\operatorname{tg}^2\varphi = f\operatorname{tg}^2\varphi,$$

где f – фокусное расстояние.

С учетом (9) получим

$$dN_0 = \frac{kr_0}{k+1}\left[\frac{1}{\sqrt{1+(k+1)\operatorname{tg}^2\varphi}} - 1\right]\sin\varphi d\varphi. \qquad (11)$$

Для параболической поверхности

$$dN_0 = \frac{r_0}{2}\operatorname{tg}^2\varphi\sin\varphi d\varphi.$$

Отметим, что в (11) значения $d\varphi$ определяются по формуле (7) на основе экспериментальных данных, а остальные параметры (k, r_0, φ) относятся к теоретической поверхности.

Пример контроля гиперболического зеркала телескопа VISTA

z, мм	h, мм	tgφ	φ	$d\varphi$	dN_0, мкм
5	14,9931	0,049713	2°50′37″	7,6″	0,051
10	29,9718	0,070067	4°00′05″	5,3″	0,100
15	44,9354	0,085525	4°52′35″	4,3″	0,148
20	59,8834	0,098424	5°36′12″	3,7″	0,194
25	74,8151	0,109673	6°14′03″	3,3″	0,238
30	89,7300	0,119741	6°47′46″	2,9″	0,281
35	104,6274	0,128907	7°18′20″	2,7″	0,323
40	119,5068	0,137352	7°46′22″	2,5″	0,363
45	134,3677	0,145205	8°12′19″	2,3″	0,402

Численный пример

Рассмотрим в качестве примера вторичное гиперболическое зеркало телескопа VISTA с параметрами: $D_{св} = 1241$ мм, $r_0 = 4018{,}81$ мм, $k = -5{,}548792$.

Для того чтобы определить чувствительность метода, положим, что каждый луч сместится в плоскости регистрации на одинаковую величину $dh = 10$ мкм, соответствующую размеру пиксела матрицы ПЗС. Пусть центры отверстий диафрагмы Гартмана имеют шаг 5 мм.

Результаты вычислений по формулам (4), (6), (7), (11) представим в таблице.

Как видно из таблицы, для $z = 45$ мм имеем $dN_0 = 0{,}402$ мкм $\approx 0{,}6\lambda$, для $\lambda = 0{,}632$ мкм, поэтому в приведенном случае контроль будет иметь средний класс точности.

Экспериментальная проверка возможности реализации метода

Экспериментальная проверка проведена на выпуклой сферической поверхности, имеющей радиус кривизны 275 мм, стрелку прогиба 30 мм, и подтвердила возможность практического применения изложенного метода. На рис. 3 приведена гартманограмма, полученная при контроле.

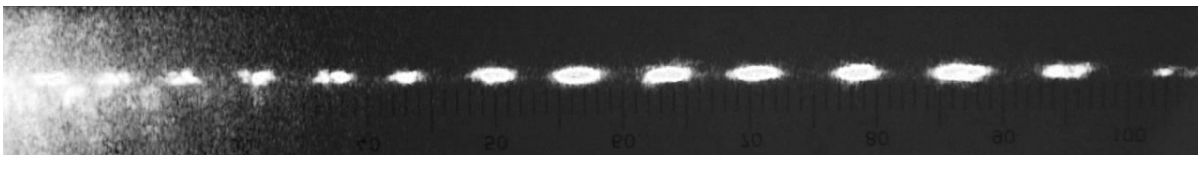


Рис. 3. Гартманограмма, полученная при контроле сферического зеркала.

Заключение

Предлагаемый метод, с точки зрения авторов, может быть применен в производственных условиях для шлифованных поверхностей, так как при больших углах падения шлифованная поверхность обладает хорошими отражающими свойствами. Очевидно, что метод может быть достаточно просто автоматизирован при вращении контролируемой поверхности вокруг оси симметрии и оперативной обработке информации, поступающей на линейку ПЗС. Метод не требует применения вспомогательных оптических деталей, а поэтому достаточно прост и обеспечивает необходимую точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Максутов Д.Д.* Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. 272 с.
2. *Campos-García M., Díaz-Uribe R., Granados-Agustín F.* Testing Fast Aspheric Convex Surfaces with a Linear Array of Sources // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 6255–6264.
3. *Пуряев Д.Т.* Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.