

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПРИЗМЫ ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ ШИРОКИХ ПОЛЕЙ ОБЗОРА

© 2010 г. М. В. Дорофеева, канд. техн. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: postmaster@gipo.kazan.ru

Рассмотрена работа прямоугольной сканирующей призмы, установленной внутри сферического обтекателя. Показано влияние параметров и взаимного расположения призмы и обтекателя на качество изображения оптической системы в процессе сканирования зоны обзора.

Ключевые слова: сканирование, прямоугольная призма, сферический обтекатель.

Коды OCIS: 200.0220; 200.0200

Поступила в редакцию 01.10.2009

При решении ряда научных и практических задач возникает необходимость в обзоре полусферической (или близкой к ней) зоны пространства. В частности, такой обзор требуется в приборах обнаружения различного рода малоразмерных теплоизлучающих объектов. В качестве сканирующего устройства в подобных приборах возможно использование призмы-куб, расположенного перед объективом и вращающегося (или колеблющегося) относительно двух взаимно перпендикулярных осей, одна из которых совпадает с оптической осью объектива, а вторая – перпендикулярна главному сечению призмы. При очень компактной конструкции призма-куб работает только в параллельных пучках лучей, и при ее установке внутри сферического обтекателя требуется введение дополнительной перемещающейся линзы [1]. В отличие от призмы-куб прямоугольная призма с некоторыми ограничениями может применяться в сочетании со сферическим обтекателем.

На рис. 1 изображена оптическая схема прибора обнаружения. Она содержит защитный элемент (обтекатель) 1, сканирующую призму 2, объектив 3 и многоэлементный фотоприемник 4. Центр обтекателя O_0 расположен на оптической оси объектива OO . При вращении призмы вокруг оси O_1 главный луч, вышедший из центра фотоприемника и прошедший через призму в обратном ходе, перемещается относительно точки O_0 , вследствие чего возникает децентрировка обтекателя относительно объекти-

ва. Ее значение зависит от угла поворота призмы α вокруг оси O_1 , размеров призмы и расстояния от точки O_0 до оси O_1 . Поскольку сферический обтекатель обладает оптической силой, его децентрировка, а также изменяющийся наклон призмы относительно объектива влияют на качество изображения оптической системы.

В работах [2, 3] при расчете призмы, работающей в напряженных условиях и при больших полях зрения, рекомендуется использовать точные формулы, учитывающие параметры действительного проходящего через нее пучка лучей, который в большинстве случаев имеет форму кругового конуса. Исходными данными для расчета размеров сканирующей прямоугольной призмы являются зона обзора $2\omega_0$,

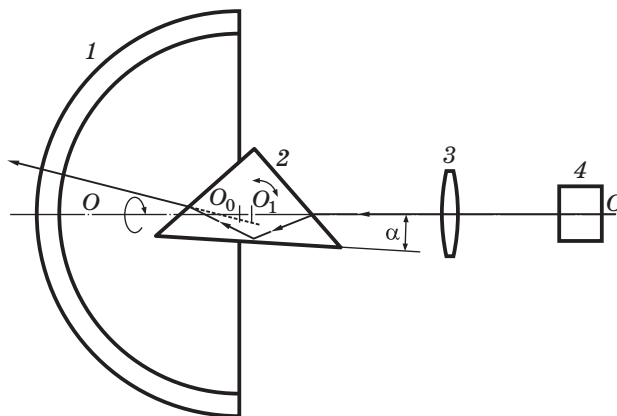


Рис. 1. Оптическая схема прибора обнаружения.

угловое поле зрения объектива 2ω , диаметр пучка лучей d в месте расположения преломляющей грани призмы, обращенной к объективу, и показатель преломления материала призмы n .

Диапазон углов поворота призмы вокруг оси O_1 составляет в общем случае $\Delta\alpha \geq (\omega_0/2) - \omega$, а при обзоре полусферы – $\Delta\alpha \geq (45^\circ - \omega)$ с учетом того, что отклонение луча призмой в два раза больше угла ее поворота. Длина хода луча в призме изменяется при сканировании и достигает максимального значения при минимальном угле между ее гипотенузной гранью и оптической осью системы, составляющем $\alpha_1 \leq \omega/2$. Поэтому габаритные размеры призмы следует численно определять при таком ее расположении.

На рис. 2 показан ход лучей через развертку призмы ABC в направлении от объектива. Ось O_1 расположена на биссектрисе прямого угла B с целью уменьшения дисбаланса призмы при ее движении. Кроме указанных выше параметров, обозначено: z_1 – смещение осевого луча при прохождении через развертку призмы, i_1 и i'_1 , i_2 и i'_2 – соответственно, углы падения и преломления осевого и крайнего лучей, O'_1 – изображение на развертке оси O_1 , O_0 и O'_0 соответственно, центр обтекателя и его изображение на развертке. Расстояние между точкой O'_0 и направлением выходящего из развертки призмы осевого луча является значением децентрировки обтекателя e_1 при данном расположении призмы.

Из треугольников ADE и ACE определим отрезок AE , а затем длину гипотенузной грани l призмы и длину ее катета c

$$AE = d \cos \omega / \cos(i_1 + \omega), \quad (1)$$

$$l = AC = AE \cos i_2 / \sin(45^\circ - i'_2) = d \cos i_2 \cos \omega / [\sin(45^\circ - i'_2) \cos(i_1 + \omega)], \quad (2)$$

где $i_1 = 45^\circ - \alpha_1$, $i'_2 = \arcsin\{[(\sin(i_1 + \omega))/n]\}$,

$$c = AB = l / \sqrt{2}. \quad (3)$$

Длина хода луча в призме, равная длине отрезка GK , определяется выражением

$$l_x = c / \cos i'_1, \quad (4)$$

где $i'_1 = \arcsin[(\sin i_1)/n]$.

Изменение длины l_x при максимальном изменении угла i_1 (от 0 до 45°) составляет 0,134 c при $n = 1,5$ и 0,016 c при $n = 4,0$.

Графики, приведенные на рис. 3, дают наглядное представление о зависимости отношения l/d от показателя преломления n при различ-

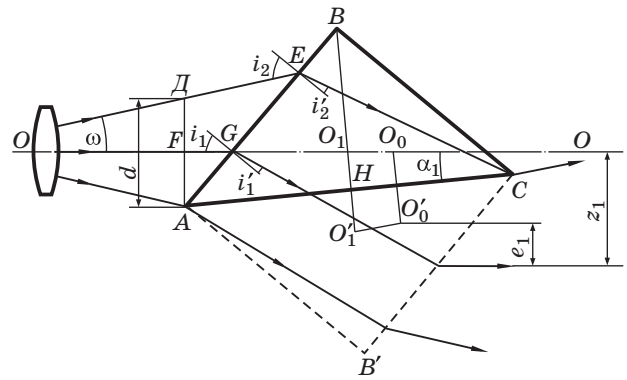


Рис. 2. Развертка призмы.

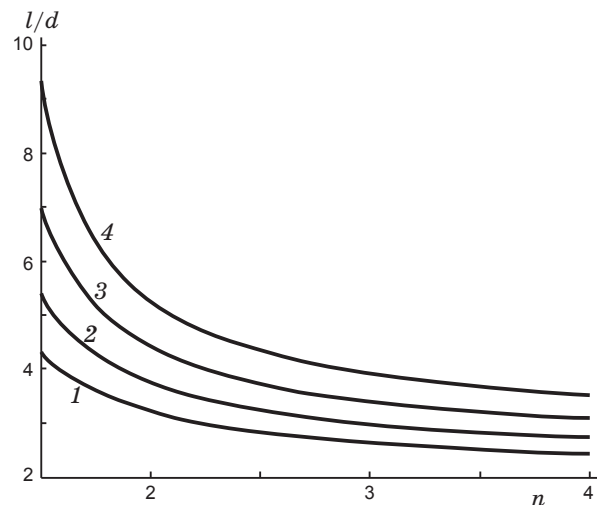


Рис. 3. Зависимости отношения l/d от показателя преломления n при различных углах ω . 1 – 0° , 2 – 5° , 3 – 10° , 4 – 15° .

ных углах ω . С целью уменьшения размеров призмы применительно к коническому пучку лучей с относительно большим углом ω следует использовать материал с большим n .

Для определения децентрировки обтекателя e_1 вновь обратимся к рис. 2. Обозначим отрезок $O_1O_0 = g$. Его значение будем считать положительным при расположении точки O_0 справа от точки O_1 и отрицательным – при расположении слева от O_1 .

Из треугольников AFG и BGO_1 найдем

$$BO_1 = (c \sin(45^\circ + \alpha_1) - d/2) / \cos \alpha_1. \quad (5)$$

Кроме того, из рассмотрения рисунка следует

$$O_1O'_1 = 2(BH - BO_1) = 2(l/2 - BO_1), \quad (6)$$

$$O_0O'_0 = O_1O'_1 - 2g \sin \alpha_1, \quad (7)$$

$$e_1 = z_1 - O_0O'_0 \cos \alpha_1. \quad (8)$$

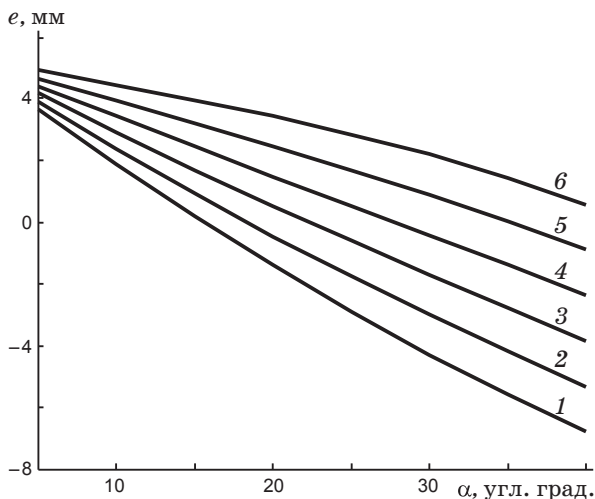


Рис. 4. Зависимости децентрировки обтекателя e от угла α при различных смещениях g . 1 – $-1,5$, 2 – 0 , 3 – $-1,5$, 4 – $-3,0$, 5 – $-4,5$, 6 – $-6,0$ мм.

Известно, что поперечное смещение луча, проходящего через наклонную плоскопараллельную пластинку (в данном случае через развертку призмы, равную длине ее катета c), определяется по формуле [3]

$$z_1 = c \sin i_1 \left(1 - \cos i_1 / \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} \right). \quad (9)$$

В общем случае при повороте призмы на произвольный угол α формулы (7–9) будут иметь вид

$$O_0 O'_0 = O_1 O'_1 - 2g \sin \alpha, \quad (10)$$

$$e = z - O_0 O'_0 \cos \alpha, \quad (11)$$

$$z = c \sin i \left(1 - \cos i / \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \right), \quad (12)$$

где $i = 45^\circ - \alpha$.

Рассмотрим изменение величины e как функцию угла α на конкретном примере при следующих исходных данных: $2\omega_0 = 180^\circ$, $2\omega = 26^\circ$, $d = 12$ мм, $n = 3,424$. Найдем $\alpha_1 \leq 6,5^\circ$. Приняв $\alpha_1 = 5^\circ$ (с учетом перекрытия угловых полей при

сканировании), получим: $\Delta\alpha = 35^\circ$, $c = 26$ мм. На рис. 4 приведены графики зависимости e от α при различных значениях g . Как видно, при смещении центра обтекателя в положительную сторону децентрировка на краю зоны обзора (при $\alpha = 40^\circ$) несколько увеличивается, в центре зоны (при $\alpha = 5^\circ$) заметно уменьшается и при некотором значении g может быть равна нулю. При этом увеличивается высота обтекателя, необходимая для пропускания пучков лучей на краю зоны обзора без виньетирования, а следовательно, сложность его изготовления. В ряде случаев целесообразно выбрать такое значение g , при котором влияние децентрировки примерно одинаково в центре и на краю зоны обзора.

Децентрировка обтекателя и наклон призмы вызывают появление дополнительных aberrаций в точке изображения на оптической оси объектива, а именно, комы и астигматизма. В качестве иллюстрации рассмотрим оптическую систему с обтекателями из различных материалов с радиусами кривизны поверхностей 40 и 35 мм, призмой, параметры которой и углы поворота приведены выше, и объективом в виде безабберационной парааксиальной линзы с фокусным расстоянием 20 мм и относительным отверстием 1:2. Примем значение $g = 1,2$ мм, при котором абсолютное значение децентрировки одинаково для крайних углов поворота призмы и равно 4,1 мм. В таблице приведены результаты расчетов комы $\delta y'_k$, астигматизма $(x'_s - x'_m)$ и концентрации энергии F , сосредоточенной в кружке, равном кружке Эри, от бесконечно удаленного точечного источника при крайних положениях призмы. Расчеты выполнены с помощью пакета программ ZEMAX. Как видно, кома зависит от оптической силы обтекателя и примерно одинакова в центре и на краях зоны обзора. С увеличением угла наклона призмы к оптической оси объектива и с уменьшением модуля фокусного расстояния обтекателя $|f'_0|$ астигматизм увеличивается, а концентрация энергии F уменьшается.

Результаты расчета комы, астигматизма и концентрации энергии при крайних положениях призмы для обтекателей, различающихся оптической силой

Материал обтекателя	f'_0 , мм ($\lambda = 4,5$ мкм)	α , угл. град.	$\delta y'_k$, мкм	$(x'_s - x'_m)$, мкм	F , %
Керамика КО1	-1090,5	40	-5,1	-10,7	82,6
		5	5,5	-11,9	82,3
Лейкосапфир	-709,7	40	-6,7	-13,3	81,8
		5	6,8	-16,6	80,8
Германий	-372,7	40	-8,4	-11,6	80,9
		5	8,9	-27,6	75,4

Изменение длины хода луча в призме при сканировании в рассматриваемом примере составляет $0,018 c = 0,46$ мм, что практически не вызывает расфокусировки изображения на фотоприемнике, поскольку обтекатель является слабой отрицательной линзой.

Окончательный выбор параметров сферического обтекателя и его расположения относительно сканирующей призмы может быть сделан на основании оценки качества изображения с реальным объективом в соответствии с требова-

ниями, предъявляемыми к оптической системе в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
2. *Русинов М.М.* Габаритные расчеты оптических систем. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 400 с.
3. *Кожевников Ю.Г.* Оптические призмы. М.: Машиностроение, 1975. 192 с.