

А. И. КНЯХИН, Ф. В. МОЛЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ

## СИНТЕЗ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ АВТОКОЛЛИМАТОРОВ С СОВМЕЩЕННЫМ МАТРИЧНЫМ ПОЛЕМ

Рассматривается метод расчета параметров отражателей в виде трехгранного зеркала для измерения трех угловых координат с помощью автоколлиматора с упрощенной структурой. Приводится анализ параметров отражателей для трехкоординатных измерений.

**Ключевые слова:** автоколлимация, трехкоординатные измерения, отражатель в виде трехгранного зеркала, инвариантная ось.

Для контроля взаимного положения элементов крупногабаритных экспериментальных установок, например опто- и радиотелескопов [1, 2] и космических систем оптической локализации [3], а также для измерения компенсируемых пространственных деформаций корпусов и опор блоков систем астронавигации [4] применяются трехкоординатные оптико-электронные автоколлиматоры, в которых для измерений используются специальные отражатели, размещаемые на объекте контроля [5].

Известные трехкоординатные системы [5], построенные по оптической схеме с единым коллиматором (рис. 1), содержат автоколлиматор для измерения коллимационных углов (углов поворота отражателя относительно осей, перпендикулярных оптической оси объектива автоколлиматора) и дополнительный приемный канал для измерения угла скручивания (угла поворота отражателя относительно оптической оси объектива автоколлиматора). В состав автоколлиматора входят точечная излучающая марка 1, объектив 2, отражатель 3 и фотоприемная матрица 4, а в состав приемного канала — объектив 5 и фотоприемная матрица 6.

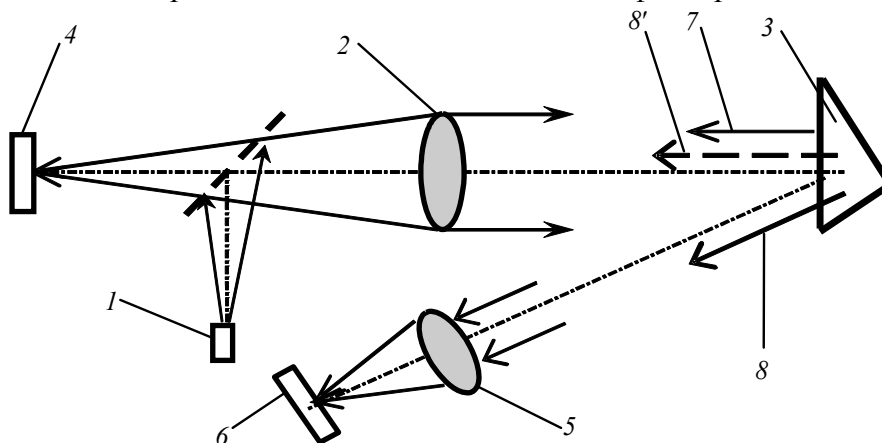


Рис. 1

Отражатель 3 автоколлиматора выполнен в виде призмного углового отражателя, двугранные углы между отражающими гранями которого имеют малые отклонения от  $90^\circ$ . Некоторые лучи — часть 7 — пучка автоколлиматора отражаются от преломляющей грани отражателя 3 как от автоколлимационного зеркала и формируют изображение марки на фотоприемной матрице 4; второе изображение марки, созданное основными лучами — частью 8 — пучка после его отражения от внутренних граней отражателя 3, регистрируется матрицей 6. При поворотах отражателя пучки 7 и 8 отклоняются от исходного направления, что приводит к пропорциональному смещению формируемых ими изображений. После измерения величин смещений с помощью матричных фотоприемников 4 и 6 (ПЗС или КМОП), сопряженных

с микропроцессорами обработки видеокладов, при известных фокусных расстояниях объективов измеряются углы поворота.

Известны также трехкоординатные системы с полностью разделенными оптическими схемами каналов измерения коллимационных углов и угла скручивания [5]. Фактическое использование двух различных отражательных систем (входной грани и отражающих граней уголкового отражателя) значительно усложняет структуру автоколлиматора. Вследствие виньетирования пучка 7 рабочая дистанция не превышает 1—3 м, что недостаточно для решения многих практических задач [5].

Возможен вариант, когда при определенном соотношении параметров трехгранного угла, образованного отражающими гранями уголкового отражателя, пучок 7 формируется тремя отражающими гранями. При этом чувствительность пучка 7 к изменению коллимационных углов значительно меньше, чем чувствительность при отражении от плоского зеркала, что позволяет практически устранить влияние виньетирования. В этом случае пучок 8 отклонен от оптической оси объектива на малый угол (см.  $\delta'$  на рис. 1) и для его приема может использоваться объектив 2 автоколлиматора. В результате поля анализа изображений, соответствующие различным измерительным каналам, совмещаются на одной фотоприемной матрице 4, что значительно упрощает оптическую схему трехкоординатного автоколлиматора и расширяет его метрологические возможности. Частный случай расчета параметров такого уголкового отражателя, основанного на результатах анализа пространственных поворотов отражающих граней при формировании требуемого трехгранного угла, приведен в работе [6].

Использование теории „инвариантных осей“ (другой вариант термина — основное неизменное направление) позволяет разработать относительно несложную методику синтеза отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров с совмещенным матричным полем.

Алгоритм автоколлимационного измерения углов поворота отражателя имеет следующий вид:

$$\mathbf{B} = \mathbf{M}_\Theta \cdot \mathbf{A} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M}_d \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  — орты отраженного и падающего пучков соответственно, заданные в неподвижной системе координат  $XYZ$  автоколлиматора;  $\mathbf{M}_d$  — матрица действия трехгранного зеркала, заданная в системе координат  $X_1Y_1Z_1$ ;  $\mathbf{M}_r$  и  $\mathbf{M}_r^{-1}$  — матрицы прямого и обратного преобразований координат, описывающих поворот отражателя (рис. 2).

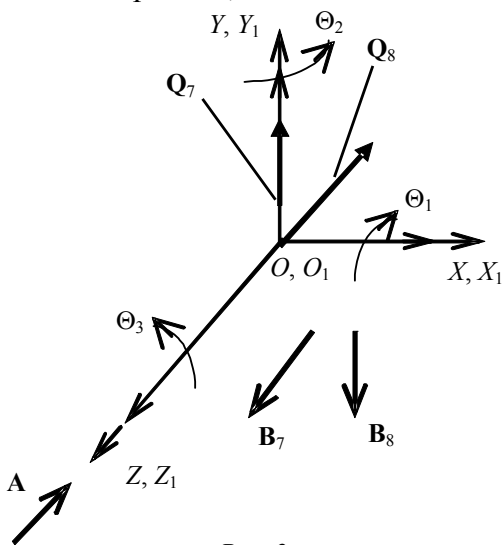


Рис. 2

Для уменьшения погрешности, обусловленной взаимовлиянием процессов измерения контролируемых углов, направляющие векторы  $\mathbf{Q}_7$ ,  $\mathbf{Q}_8$  инвариантных осей трехгранного зеркала, соответствующие матрицам действия  $\mathbf{M}_7$ ,  $\mathbf{M}_8$ , определяющим отраженные пучки 7 и 8, должны быть взаимно-перпендикулярны и совпадать, соответственно, с осями  $O_1Y_1$  и  $O_1Z_1$  [7]. Матрицы действия отражателя для двух рассматриваемых пучков при этом определяются как

$$\mathbf{M}_7 = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_8 = \begin{bmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ 0 & -1 & 0 \\ -\sin \omega & 0 & \cos \omega \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\omega$  — угол поворота пучка относительно инвариантной оси при отражении.

При малых величинах отклонения двугранных углов трехгранного зеркала от  $90^\circ$  с каждой инвариантной осью может быть связан вектор  $\mathbf{Q}$ , определяющий угол поворота пучка:

$$\omega \approx \pi - 2 \cdot |\mathbf{Q}|. \quad (4)$$

Тогда матрицы действия трехгранного зеркала при малой величине модуля  $\mathbf{Q}$  определяются как

$$\mathbf{M}_7 = \begin{bmatrix} -1 & -2 \cdot |\mathbf{Q}| & 0 \\ 2 \cdot |\mathbf{Q}| & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_8 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 2 \cdot |\mathbf{Q}| \\ 0 & -1 & 0 \\ -2 \cdot |\mathbf{Q}| & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Составляющие ортов отраженных пучков  $\mathbf{B}_7, \mathbf{B}_8$  определяются при подстановке матриц (5) и (6) в алгоритм (1) при условии осевого падения пучка, орт которого  $\mathbf{A} = [0 \ 0 \ -1]^T$ :

$$\mathbf{B}_{7X} = 2 \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \Theta_2, \quad \mathbf{B}_{7Y} = 2 \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \Theta_1, \quad \mathbf{B}_{8X} \approx 2 \cdot |\mathbf{Q}|, \quad \mathbf{B}_{8Y} = 2 \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \Theta_3. \quad (7)$$

Также формируются и пучки с обратной последовательностью отражений, выражения для составляющих их ортов  $\mathbf{B}'_7, \mathbf{B}'_8$  имеют знаки, противоположные указанным в выражениях (7). Для измерений может использоваться любая пара пучков или, в зависимости от алгоритма обработки изображения, две сразу.

Как следует из выражений (7), три угла измеряются независимо друг от друга, причем чувствительность к изменению коллимационных углов пропорциональна величине модуля  $2 \cdot |\mathbf{Q}|$  направляющего вектора и, следовательно, значительно меньше, чем при измерениях с использованием автоколлимационного зеркала.

Определим общие условия реализации матриц действия  $\mathbf{M}_7, \mathbf{M}_8$  трехгранного зеркала (см. формулы (5), (6)).

Пусть углы между гранями трехгранного зеркала (соответственно 1 и 2, 2 и 3, 3 и 1) отличаются на величины  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  от  $90^\circ$  (рис. 3). Зададим соотношения между величинами  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  как  $\delta_2 = \delta, \delta_1 = k_1 \delta, \delta_3 = k_2 \delta$ , где  $k_1, k_2$  — некоторые коэффициенты. Выражения, определяющие составляющие направляющих векторов  $\mathbf{Q}_7, \mathbf{Q}_8$  инвариантных осей для последовательностей отражения 2—1—3 и 1—2—3 пучка от граней, задаются в табл. 1 [6]. Значения составляющих для обратных последовательностей отражения имеют противоположные знаки.

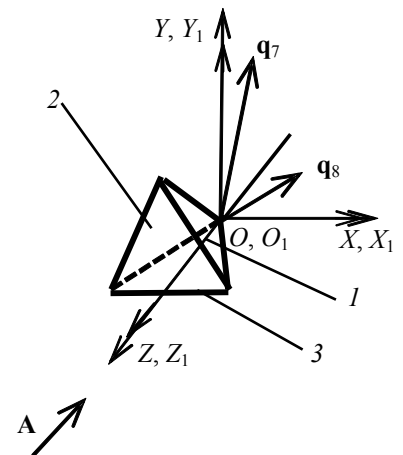


Рис. 3

Таблица 1

| Ось    | Составляющая вектора $\mathbf{Q}_7$<br>(последовательность отражения 2—1—3) | Составляющая вектора $\mathbf{Q}_8$<br>(последовательность отражения 1—2—3) |
|--------|---|---|
| $OX_1$ | $\frac{\sqrt{2} \cdot \delta}{2}(1+k_2)$                                    | $\frac{\sqrt{2} \cdot \delta}{2}(1+k_2)$                                    |
| $OY_1$ | $\frac{\sqrt{6} \cdot \delta}{6}(1-k_2+2k_1)$                               | $\frac{\sqrt{6} \cdot \delta}{6}(1-k_2-2k_1)$                               |
| $OZ_1$ | $\frac{\sqrt{3} \cdot \delta}{3}(-1+k_2+k_1)$                               | $-\frac{\sqrt{3} \cdot \delta}{3}(1-k_2+k_1)$                               |

Приравнявая нулю скалярное произведение направляющих векторов  $\mathbf{Q}_7$  и  $\mathbf{Q}_8$ , найдем соотношение между коэффициентами  $k_1$  и  $k_2$ , при котором инвариантные оси будут перпендикулярны:

$$k_2^2 - k_1^2 + 1 = 0. \quad (8)$$

Модуль направляющих векторов при условии (8) определяется выражением

$$|\mathbf{Q}| = \delta\sqrt{2} \cdot \sqrt{k_2^2 + 1}. \quad (9)$$

Для совмещения направляющих векторов  $\mathbf{Q}_7$ ,  $\mathbf{Q}_8$  инвариантных осей с координатными осями  $O_1Y_1$  и  $O_1Z_1$  необходимо повернуть трехгранное зеркало относительно исходного положения на некоторые начальные углы  $\Xi_1$ ,  $\Xi_2$ ,  $\Xi_3$  относительно соответствующих осей координат.

Величины начальных углов определяются из уравнений

$$(0 \ 0 \ -1)^T = \mathbf{M}_{\Xi} (\mathbf{q}_{7X} \ \mathbf{q}_{7Y} \ \mathbf{q}_{7Z})^T; \quad (10)$$

$$(0 \ 1 \ 0)^T = \mathbf{M}_{\Xi} (\mathbf{q}_{8X} \ \mathbf{q}_{8Y} \ \mathbf{q}_{8Z})^T, \quad (11)$$

где  $\mathbf{q}_7 = \mathbf{Q}_7/|\mathbf{Q}|$ ,  $\mathbf{q}_8 = \mathbf{Q}_8/|\mathbf{Q}|$  — орты направляющих векторов  $\mathbf{Q}_7$ ,  $\mathbf{Q}_8$ ;  $\mathbf{M}_{\Xi}$  — матрица поворота, определяемая выражением

$$\mathbf{M}_{\Xi} = \begin{bmatrix} \cos \Xi_2 \cdot \cos \Xi_3 & -\cos \Xi_2 \cdot \sin \Xi_3 & \dots \\ \cos \Xi_3 \cdot \sin \Xi_1 \cdot \sin \Xi_2 + \cos \Xi_1 \cdot \sin \Xi_3 & \cos \Xi_1 \cdot \cos \Xi_3 - \sin \Xi_1 \cdot \sin \Xi_2 \cdot \sin \Xi_3 & \dots \\ \sin \Xi_3 \cdot \sin \Xi_1 - \cos \Xi_1 \cdot \cos \Xi_3 \cdot \sin \Xi_2 & \cos \Xi_1 \cdot \sin \Xi_2 \cdot \sin \Xi_3 + \cos \Xi_3 \cdot \sin \Xi_1 & \dots \\ \dots & \sin \Xi_2 & \\ \dots & -\cos \Xi_2 \cdot \sin \Xi_1 & \\ \dots & \cos \Xi_1 \cdot \cos \Xi_2 & \end{bmatrix}.$$

Система из трех уравнений, выбранных из совокупности (10) и (11), решается численными методами в программе MathCAD при различных значениях коэффициента  $k_2$ . Некоторые результаты расчета, позволяющие задать матрицы действия (2) и (3) отражателя, а также ориентировать его апертуру относительно падающего пучка, приведены в табл. 2. Значение угла  $\Psi$  определяет наклон апертуры трехгранного зеркала относительно падающего пучка.

Таблица 2

| $k_2$ | $k_1$ | $ \mathbf{Q} $          | $\Xi_1$ | $\Xi_2$ | $\Xi_3$ | $\Psi, \dots^\circ$ |
|-------|-------|-------------------------|---------|---------|---------|---------------------|
| -2    | 2,24  | 3,168                   | 9°42'   | -14°58' | -10°53' | 17                  |
| -1,8  | 2,06  | 2,918                   | 9°20'   | -12°57' | -9°22'  | 16                  |
| -1,5  | 1,80  | 2,558                   | 10°48'  | -9°13'  | -6°35'  | 13                  |
| -1,2  | 1,56  | 2,218                   | 10°23'  | -4°14'  | -3°     | 11                  |
| -0,9  | 1,35  | 1,908                   | 10°18'  | 3°32'   | 2°15'   | 10                  |
| -0,6  | 1,17  | 1,658                   | 9°5'    | 12°35'  | 9°47'   | 14                  |
| -0,3  | 1,04  | 1,488                   | 7°46'   | 23°14'  | 18°44'  | 24                  |
| 0     | 1     | $\sqrt{2} \cdot \delta$ | 5°      | 27°54'  | 21°44'  | 27                  |

Следует отметить два особенных варианта:

- аналитическое решение:  $k_2 = -1$ ,  $k_1 = \sqrt{2}$ ,  $\Xi_1 = \arctg(3 - 2\sqrt{2}) = 9^\circ 50'$ ,  $\Xi_2 = 0$ ,  $\Xi_3 = 0$ ,  $|\mathbf{Q}| = 2\delta$ , при котором потери светового потока вследствие наклона отражателя минимальны;
- решение, соответствующее  $k_2 = 0$ , при котором реализуется оригинальный отражатель с отклонением от  $90^\circ$  только двух углов трехгранного зеркала.

Представленная общая методика синтеза отражателей в виде трехгранных зеркал позволяет выполнить инженерный расчет параметров различных отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров с совмещенным матричным полем.

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных по федеральной целевой программе „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пинигин Г. И. Телескопы наземной оптической астрометрии: Учеб. пособие. Николаев: Атолл, 2000. 104 с.
2. Артеменко Ю. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные системы измерения деформаций элементов конструкции радиотелескопа миллиметрового диапазона РТ-70 (Суффа) // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 5—10.
3. Игнатенко Ю. В., Тряпцин В. Н., Игнатенко И. Ю. Отклонение света от заданного направления в околоземном космическом пространстве [Электронный ресурс]: Науч.-техн. интернет-журнал „Исследовано в России“. 2009. С. 344—353: <<http://zhurnal.apc.relam.ru/articles/2009/034.pdf>>.
4. Бутырин С. А., Иванов А. В. Геометрическая калибровка взаимного углового положения телескопа и астродатчиков // Вестн. Самарского техн. ун-та (технические науки). 2008. Вып. 1(21). С. 181—183.
5. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин, Э. Д. Панков; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
6. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: СПб ГИТМО(ТУ), 2000. 197 с.
7. Коняхин И. А., Копылова Т. В., Коняхин А. И., Мерсон А. Д. Синтез частных инвариантных преобразований в оптико-электронных системах измерения угла скручивания // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 3(67). С. 12.

#### Сведения об авторах

- Алексей Игоревич Коняхин** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: [aligkon@yandex.ru](mailto:aligkon@yandex.ru)
- Федор Владимирович Молев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: [timofeev@grv.ifmo.ru](mailto:timofeev@grv.ifmo.ru)

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
07.02.13 г.