

УДК 681.786

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ АВТОКОЛЛИМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ИНВАРИАНТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА СКРУЧИВАНИЯ

И.А. Коныхин, Т.В. Копылова

Рассмотрена оптико-электронная автоколлимационная система с тетраэдрическим отражателем, два двугранных угла между гранями которого имеют малое отступление от  $90^\circ$ . Установлено, что такая система, построенная по симметричной относительно оси скручивания схеме хода пучка с дополнительным переотражением, реализует инвариантное измерение угла скручивания к поворотам на коллимационные углы.

**Ключевые слова:** автоколлиматор, инвариант, угол скручивания, тетраэдрический отражатель, чувствительность измерения угла скручивания.

### Введение

Основным направлением развития оптико-электронных автоколлимационных систем измерения углового положения контролируемого объекта является обеспечение инвариантности измерения отдельных угловых координат [1]. Наиболее интересно (перспективно) исследование автоколлимационных систем инвариантного измерения угла скручивания, задаваемого относительно оптической оси объектива автоколлиматора (оси скручивания).

В рассмотренной ранее схеме трехкоординатного автоколлиматора с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания [2] в качестве контрольного элемента используется тетраэдрический отражатель (ТО), у которого два из двугранных углов между отражающими гранями имеют заданное отступление  $\delta$  от  $90^\circ$ . При отражении такой ТО разделяет падающий по оси пучок автоколлиматора на две пары пучков, одна из которых может использоваться для измерения угла скручивания. Каждый из пучков пары для измерения угла скручивания  $\Theta_3$  составляет с осью объектива автоколлиматора угол  $\Delta$ , который численно равен коэффициенту передачи между углом поворота ТО на угол скручивания и отклонением отраженного пучка от первоначального направления и, соответственно, определяет чувствительность измерения скручивания. Увеличение чувствительности  $\Delta$  при использовании типового автоколлиматора с малым угловым полем обеспечивается переотражением пучка, реализуемым дополнительным плоским зеркалом. Коллимационные углы измеряются по части пучка, отраженной от фронтальной грани ТО как от автоколлимационного зеркала.

Отраженные ТО пучки строят в фокальной плоскости объектива автоколлиматора изображения марки. При повороте объекта, с которым связан ТО, на малые углы  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  относительно осей  $OX, OY, OZ$  изображения марки сместятся на величину, пропорциональную углам поворота. Анализ точных выражений для ортов отраженного пучка показал, что практически не обеспечивается инвариантность измерения угла скручивания от одного из коллимационных углов [2]. Таким образом, необходимы исследования путей обеспечения инвариантности измерения угла скручивания при одновременном увеличении чувствительности измерения этой угловой координаты.

### Основные положения

Для реализации инвариантного измерения угла скручивания предлагается использовать схему автоколлиматора с переотражением пучка, но при симметричном относительно оси скручивания расположении ортов падающего и отраженного ТО пучков (рисунок) [3].

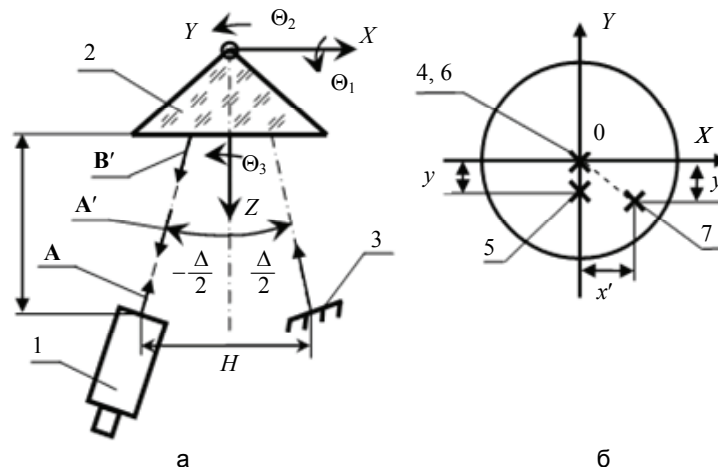


Рисунок. Схема автоколлиматора инвариантного измерения угла скручивания (а): 1 – автоколлиматор; 2 – тетраэдрический отражатель; 3 – плоское зеркало. Изображение марки автоколлиматора в фокальной плоскости приемного объектива (б): 4, 6 – изображения при  $\Theta_3=0, \Theta_1=\Theta_2=0$ ; 5 – при  $\Theta_3\neq 0$ ; 7 – при  $\Theta_1\neq 0, \Theta_2\neq 0$

В такой схеме (рисунок, а) орты падающего и отраженного ТО пучков располагаются по разные стороны от оси скручивания и составляют с ней угол, равный  $\frac{\Delta}{2}$ . В результате отраженный ТО пучок для измерения угла скручивания минует приемный объектив и после отражения от зеркала 3 направляется вновь на ТО. После повторного отражения от ТО 2 этим пучком на анализаторе автоколлиматора в центре поля зрения формируется изображение 4 марки (рисунок, б). Пройдя аналогичный путь, пучок, отраженный от передней грани ТО как от автоколлимационного зеркала, формирует на анализаторе второе изображение 6.

Величина выноса дополнительного плоского зеркала относительно центра объектива составляет (рисунок, а):

$$H = 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2},$$

где  $L$  – дистанция измерений;  $\frac{\Delta}{2}$  – угол между нормалью к плоскому зеркалу и осью  $OZ$ .

При повороте объекта, с которым связан ТО, на малые углы  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  (рисунок, а) относительно осей  $OX, OY, OZ$  изображение 4 сместится на величину  $-y$  (относительно центра анализатора), пропорциональную углу  $\Theta_3$  (изображение 5 на рисунке, б). Другое изображение 6 сместится на величины  $-y', x'$ , пропорционально углам  $\Theta_1, \Theta_2$  (изображение 7). Для представленной схемы (рисунок) орт  $\mathbf{V}'$  отраженного пучка по углу скручивания определяется по выражению [4]:

$$\mathbf{V}' = \mathbf{M}_\Theta \cdot \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_\Theta \cdot \mathbf{A} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{M}_\Theta = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1}$  – матрица действия ТО,  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -1 + \frac{\Delta^2}{2} & 0 & \mp \Delta \\ 0 & -1 & 0 \\ \pm \Delta & 0 & -1 + \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix}$  – матрица действия ТО при

отсутствии измеряемого угла поворота,

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\Delta^2}{2} & 0 & -\Delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\Delta & 0 & -1 + \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

– матрица действия плоского зеркала [5];  $\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} 1 & -\Theta_3 & \Theta_2 \\ \Theta_3 & 1 & -\Theta_1 \\ -\Theta_2 & \Theta_1 & 1 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{M}_r^{-1}$  – матрицы прямого и обратного преобразований координат, описывающих поворот ТО из исходного в текущее положение и выра-

женных через измеряемые параметры угловой ориентации  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ ,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta}{2} \\ 0 \\ -1 + \frac{\Delta^2}{4} \end{bmatrix}$  – орт падающего

пучка. Орт  $\mathbf{A}'$  (рисунок) отраженного пучка от фронтальной грани ТО (измеряются коллимационные углы) определяется по выражению, аналогичному выражению (1), где  $\mathbf{M}$  – матрица действия передней грани ТО как плоского зеркала (см. (2) для  $\mathbf{M}_3$  при  $\Delta = 0$ ).

### Анализ результатов

Для симметричного хода пучка с переотражением по выражению (1) орт  $\mathbf{V}'$  (рисунок) отраженного пучка с учетом величин второго порядка малости будет равен

$$\mathbf{V}' = \begin{bmatrix} \Delta \cdot \Theta_1^2 - \frac{3 \cdot \Delta \cdot \Theta_2^2}{2} + \Delta \cdot \Theta_3^2 - \frac{\Delta}{2} \\ -2 \cdot \Delta \cdot \Theta_3 \\ 1 - \frac{\Delta^2}{8} + 2 \cdot \Theta_2^2 - 2 \cdot \Theta_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Как следует из выражения (3), по величине составляющей орта  $B_y$ , пропорциональной смещению у изображения марки, рассматриваемый отражатель реализует независимое измерение угла скручивания  $\Theta_3$  в соответствии с алгоритмом [2]:

$$\Theta_3 = -\frac{B_y}{2 \cdot \Delta} = -\frac{y}{2 \cdot \Delta \cdot f'}, \quad (4)$$

где  $f'$  – фокусное расстояние приемного объектива автоколлиматора. В результате анализа выражений (3), (4) для орта регистрируемого пучка установлена инвариантность измерения скручивания от двух коллимационных углов. В соответствии с выражением (1) орт  $A'$  отраженного пучка, с учетом величин второго порядка малости равен

$$A' = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta}{2} + 4 \cdot \Theta_2 - \frac{\Delta^2 \cdot \Theta_2}{2} + 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_1^2 + 3 \cdot \Delta \cdot \Theta_2^2 + \Delta \cdot \Theta_3^2 \\ -4 \cdot \Theta_1 + \frac{\Delta^2 \cdot \Theta_1}{2} - 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_1 \cdot \Theta_2 \\ 1 - \frac{\Delta^2}{8} + 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_2 - 8 \cdot \Theta_1^2 - 6 \cdot \Theta_2^2 - 2 \cdot \Theta_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_{x'} \\ A'_{y'} \\ A'_{z'} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Из выражения (5) по величинам составляющих орта  $A'_{x'}$  и  $A'_{y'}$ , пропорциональным смещениям  $x'$  и  $y'$  изображения марки, рассматриваемый отражатель реализует измерения коллимационных углов  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  по аналогии с алгоритмом (4):

$$\Theta_1 = \frac{A'_{y'}}{-4} = -\frac{y'}{4 \cdot f'}, \quad \Theta_2 = \frac{A'_{x'}}{4} = \frac{x'}{4 \cdot f'}. \quad (6)$$

Анализ выражений (5), (6) показывает, что в предлагаемой схеме хода лучей измерения коллимационных углов осуществляются с погрешностью, величина которой составляет не более  $1,3 \cdot 10^{-5}$  рад при диапазоне измерений в 10 угл. мин ( $\Delta = 0,1$  рад), что вполне допустимо для большинства практических применений.

### Заключение

В ходе проведенного анализа было установлено, что при автоколлимационных измерениях симметричная относительно оси скручивания схема хода пучка с дополнительным переотражением позволяет обеспечить условия инвариантного измерения угла скручивания при одновременном увеличении чувствительности измерения этой угловой координаты.

Исследования по рассмотренной тематике выполнены при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

### Литература

1. Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Панков Э.Д., Син Сянмин. Анализ частных инвариантных преобразований в оптико-электронных системах контроля пространственного положения // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 5–9.
2. Коняхин И.А., Копылова Т.В. Трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 6 (70). – С. 9–11.
3. Коняхин И.А., Копылова Т.В., Коняхин А.И., Мерсон А.Д. Определение условий соблюдения инвариантности измерения угла скручивания в оптико-электронных автоколлимационных системах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3 (67). – С. 129.
4. Джабиев А.Н., Коняхин И.А., Панков Э.Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. – 197 с.
5. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. – 237 с.

**Коняхин Игорь Алексеевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, igor@grv.ifmo.ru

**Копылова Татьяна Валерьевна**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kopylova\_tv@mail.ru