

УДК 681.786

**ТРЕХКООРДИНАТНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ АВТОКОЛЛИМАТОР  
С УВЕЛИЧЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ  
УГЛА СКРУЧИВАНИЯ**

**И.А. Коняхин, Т.В. Копылова**

Рассмотрен трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с тетраэдрическим отражателем, два двугранных угла между гранями которого имеют малое отступление от  $90^\circ$ . Установлено, что такой автоколлиматор, построенный по схеме с переотражением пучка при использовании дополнительного плоского зеркала, реализует измерения угла скручивания с увеличенной чувствительностью. Проведен анализ влияния погрешности измерения вследствие влияния поворота отражателя на коллимационные углы.

**Ключевые слова:** трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор, угол скручивания, тетраэдрический отражатель, чувствительность измерения угла скручивания.

**Введение**

Для решения метрологических (связанных с угловыми измерениями) задач эффективны трехкоординатные оптико-электронные автоколлиматоры, позволяющие контролировать положение объекта относительно двух осей, перпендикулярных оптической оси автоколлиматора (коллимационные оси), и

третьей оси – оптической оси автоколлиматора (оси скручивания), т.е. контроля поворотов объекта относительно трех взаимно перпендикулярных осей [1, 2].

В известной схеме трехкоординатного автоколлиматора в качестве контрольного элемента используется тетраэдрический отражатель (ТО), у которого два из двугранных углов между отражающими гранями имеют заданное отступление от 90°. При отражении такой ТО разделяет падающий по оси пучок автоколлиматора на две пары пучков, одна из которых может использоваться для измерения угла скручивания. Коллимационные углы измеряются по части пучка, отраженной от фронтальной грани ТО как от автоколлимационного зеркала. 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.

Величина параметра  $\Delta$  в известной схеме измерения ограничена угловым полем автоколлиматора. По этой причине трехкоординатный автоколлиматор [2] не обладает достаточной для практического применения чувствительностью к повороту на угол скручивания вследствие малости коэффициента передачи  $\Delta$ , величина которого ограничена угловым полем типовых автоколлиматоров (например, для автоколлиматора АК-0,5 с угловым полем 12 угл. мин. коэффициент передачи по скручиванию  $\Delta=0,0035$ , что значительно меньше чувствительности  $\Delta_3=2$  для коллимационных углов при использовании плоского зеркала). Указанное обстоятельство определяет необходимость исследований по увеличению чувствительности измерения угла скручивания трехкоординатными автоколлиматорами.

### Основные положения

Пусть в ТО два двугранных угла между отражающими гранями имеют равные отклонения  $\delta_2 = \delta_3 = \delta$  от 90° (рис. 1, а). Падающий на такой отражатель параллельный пучок расщепляется на две пары пучков, причем отклонения одной из них при поворотах определяются в основном углом скручивания, что позволяет реализовать независимое измерение этого угла.

Используемые для измерения скручивания пучки симметричны относительно оси падающего пучка, лежат с ним в одной плоскости и отклонены от оси объектива автоколлиматора на равные углы  $\Delta$ . Отраженные пучки строят в фокальной плоскости объектива автоколлиматора изображения 1, 2 марки автоколлиматора (рис. 1, б).

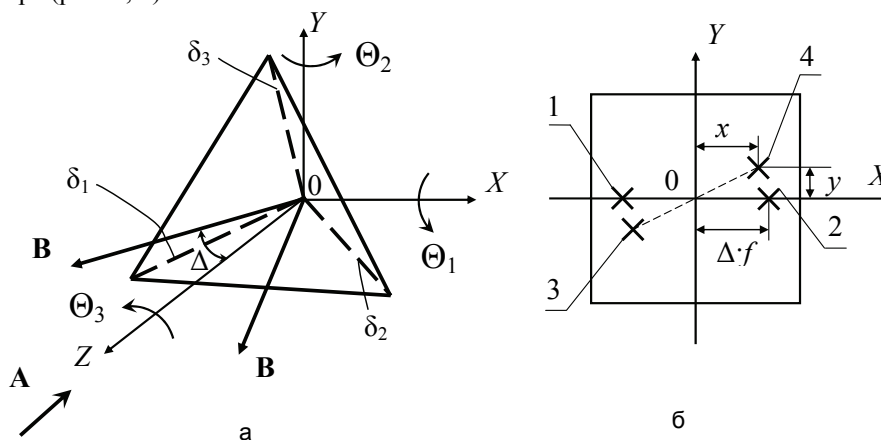


Рис. 1. а – тетраэдрический отражатель; б – изображение марки автоколлиматора в фокальной плоскости приемного объектива: 1, 2 – при  $\Theta_3=0$ ; 3, 4 – при  $\Theta_3 \neq 0$

При повороте объекта, с которым связан ТО, на малые углы  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  (рис. 1, а) относительно осей  $OX, OY, OZ$  изображения 1, 2 сместятся на величину  $\pm y$ , пропорциональную углу  $\Theta_3$  (изображения 3, 4 на рис. 1, б). В этом случае орты **В** отраженных пучков с учетом величин второго порядка малости будут равны

$$\mathbf{B}_{1,2} = \begin{bmatrix} \pm \Delta \mp \frac{\Delta \cdot \Theta_1^2}{2} \pm \frac{\Delta \cdot \Theta_2^2}{2} \mp \Delta \cdot \Theta_3^2 \\ \pm \Delta \cdot \Theta_3 + \frac{\Delta^2 \cdot \Theta_1}{2} \\ 1 - \frac{\Delta^2}{2} + \Theta_2^2 - \Theta_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\Theta_1, \Theta_2$  – коллимационные углы;  $\Theta_3$  – угол скручивания;  $\Delta$  – угол отклонения отраженного пучка от оптической оси автоколлиматора, определяющий матрицу действия отражателя:

$$M_{1,2} = \begin{bmatrix} -1 + \frac{\Delta^2}{2} & 0 & \mp \Delta \\ 0 & -1 & 0 \\ \pm \Delta & 0 & -1 + \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Как следует из выражения (1), по величине составляющей орта  $B_y$ , пропорциональной смещению  $y$  изображения марки, для любого пучка пары рассматриваемый ТО с некоторой погрешностью реализует измерения угла скручивания  $\Theta_3$  в соответствии с алгоритмом:

$$\Theta_3 = \frac{B_y}{\Delta}. \quad (3)$$

Погрешность влияния коллимационных углов при измерении скручивания равна

$$\delta_{\Theta_3} = \frac{\Delta \cdot \Theta_1}{2}. \quad (4)$$

Для повышения чувствительности  $\Delta$  при использовании типового автоколлиматора с малым угловым полем предлагается использовать схему с переотражением пучка, реализуемым дополнительным плоским зеркалом 3 (рис. 2, а).

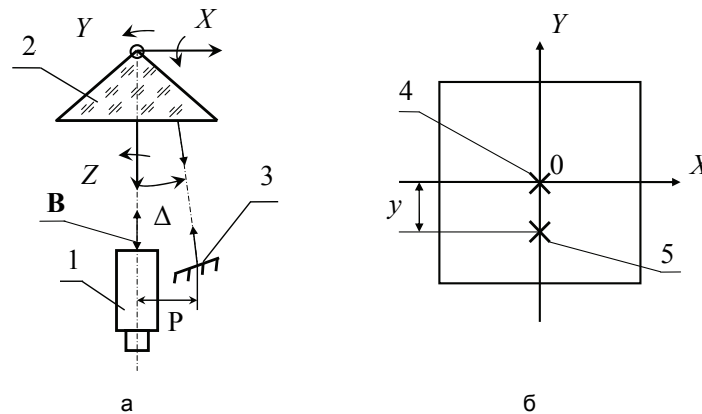


Рис. 2. а – схема автоколлиматора с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания: 1 – автоколлиматор, 2 – тетраэдрический отражатель, 3 – плоское зеркало; б – изображение марки на матрице: 4 – изображение марки при  $\Theta_3=0$ ; 5 – изображение марки при  $\Theta_3 \neq 0$

В результате отраженный ТО пучок минует приемный объектив и, после отражения от зеркала 3, направляется вновь на ТО. После повторного отражения от ТО (позиция 2 на рис. 2, а) формируется изображение 4 марки (рис. 2, б) в фокальной плоскости объектива автоколлиматора.

Поворот объекта, с которым связан ТО, на малые углы  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  вокруг осей  $OX, OY, OZ$  приводит к смещению изображения марки 4 на величину  $-y$  относительно центра анализатора (изображение 5 на рис. 2, б). Для данной схемы орт  $\mathbf{B}$  (рис. 2, а) отраженного пучка с учетом величин второго порядка малости будет равен

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_1^2 + \frac{11 \cdot \Delta \cdot \Theta_3^2}{2} \\ -2 \cdot \Delta \cdot \Theta_3 - \Delta^2 \cdot \Theta_1 + \Delta \Theta_1 \cdot \Theta_2 \\ 1 + \Theta_1^2 + 2 \cdot \Theta_2^2 - \Theta_3^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Погрешность измерения скручивания вследствие влияния коллимационных углов равна

$$\delta_{\Theta_3} = \frac{|-\Delta \cdot \Theta_1 + \Theta_1 \cdot \Theta_2|}{2}. \quad (6)$$

При практической реализации схемы с переотражением пучка величина  $P$  выноса зеркала составила 100 мм, что на дистанции до ТО 3000 мм определяет величину угла  $\Delta=0,034$  рад. Тогда в соответствии с выражением (5) коэффициент передачи равен  $K=2 \cdot \Delta=0,068$ , что практически в 20 раз больше по сравнению с чувствительностью измерения в схеме без переотражения пучка.

При этом относительная величина погрешности измерения вследствие влияния коллимационного угла при диапазоне измерения  $\Theta_{1\max} = \Theta_{2\max} = 10$  угл. мин. осталась практически неизменной (с точностью до малого слагаемого  $\Theta_1 \cdot \Theta_2 \approx 10^{-5}$  рад).

#### **Заключение**

В ходе проведенного анализа было установлено, что модернизированная схема автоколлиматора с дополнительным зеркалом позволяет увеличить чувствительность измерения угла скручивания. При этом реализуется независимое измерение угла скручивания с незначительной по величине погрешностью вследствие влияния коллимационных углов.

Исследования по рассмотренной тематике выполняются при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

#### **Литература**

1. Коняхин И.А., Панков Э.Д. Трехкоординатный автоколлиматор // Опτικο-механическая промышленность. – 1980. – № 3. – С. 19.
2. Коняхин И.А., Панков Э.Д. Трехкоординатный автоколлиматор повышенной точности // Опτικο-механическая промышленность. – 1982. – № 8. – С. 41.

**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, студентка, fleur3310@rambler.ru