

## ТРЕХКООРДИНАТНЫЙ ЦИФРОВОЙ АВТОКОЛЛИМАТОР

© 2013 И. А. Коняхин, доктор техн. наук; Т. В. Тургалиева, аспирантка

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: kopylova\_tv@mail.ru, igor@grv.ifmo.ru

Проведены исследования по определению характеристик трехкоординатного цифрового автоколлиматора в лабораторных условиях. Результаты исследований подтвердили эффективность предложенного автоколлиматора по определению угловых деформаций крупногабаритных объектов типа основного зеркала радиотелескопов.

**Ключевые слова:** автоколлиматор, тетраэдрический отражатель, угол скручивания, коллимационные углы, деформации элементов радиотелескопа.

Коды OCIS: 120.0280, 120.4640, 150.3040.

Поступила в редакцию 11.07.2013.

### Введение

Автоколлимационные системы широко используются для определения пространственного углового положения крупногабаритных объектов относительно некоторой базы. Например, исправление негомологических деформаций основного зеркала радиотелескопа миллиметрового диапазона длин волн. В частности подстройку всей поверхности основного зеркала к положению идеальной параболы возможно осуществить после измерения автоколлимационным методом отклонения нормали к поверхности зеркала от номинального положения в контролируемых точках. При этом затрагивается задача измерения взаимного положения объектов, под которыми понимаются два объекта, один из которых считается базовым (неподвижным), а второй – контролируемым (перемещается относительно него).

Для решения задач, связанных с угловыми измерениями, используются одно- и двухкоординатные автоколлиматоры. Применяемые системы позволяют контролировать положение объекта только относительно одной или двух осей, перпендикулярных оптической оси системы (коллимационные оси). Вместе с тем часто возникает необходимость контроля поворотов объекта и относительно оптической оси системы (оси скручивания). Для одновременного контроля поворотов объекта как на коллимационные углы, так и на

угол скручивания эффективны трехкоординатные оптико-электронные автоколлимационные системы, использующие тетраэдрические отражатели [1]. Известно ограниченное количество практических реализаций трехкоординатных угломеров в виде экспериментальных образцов [2]. Эти угломеры представляют собой специализированные комплексы, структурно включающие двухкоординатный автоколлиматор и дополнительный автоколлиматор для измерения угла скручивания. При измерении коллимационных углов и угла скручивания в таких угломерах анализ отраженных пучков выполняется отдельно в отдельных измерительных каналах, что значительно усложняет как структуру системы, так и процесс измерения. В ряде случаев использование двух автоколлимационных каналов невозможно. Перспективным направлением развития трехкоординатных угломеров является создание универсальной трехкоординатной системы с единым автоколлиматором.

### Схема трехкоординатного автоколлиматора. Методика расчета угловых смещений контролируемого объекта

Разработана схема трехкоординатной автоколлимационной системы [3], позволяющая измерять три угловые координаты объекта.

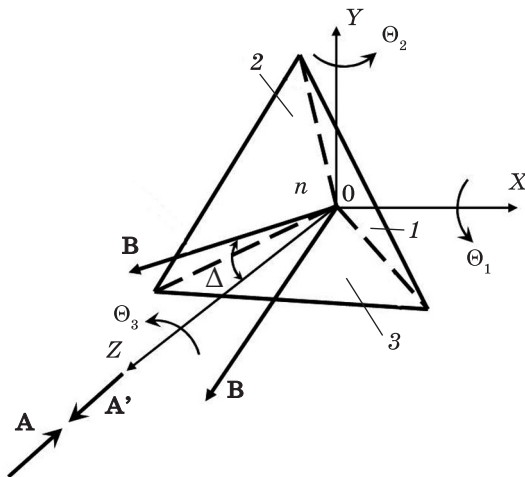
В качестве контрольного элемента (КЭ) системы, устанавливаемого на объекте, используется тетраэдрический отражатель (ТО), у которого два из двугранных углов между отражающими гранями имеют заданное отступление  $\delta_1 = \delta_2 = \delta$  от  $90^\circ$  (рис. 1). Пусть двугранный угол между отражающими гранями 2 и 3 равен  $90^\circ - \delta_1$ , между гранями 1 и 3 –  $90^\circ - \delta_2$ , а между гранями 1 и 2 –  $90^\circ$ . Тогда 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 (чувствительности измерения скручивания) между углом поворота ТО на угол скручивания и отклонением отраженного пучка от первоначального направления.

Увеличение чувствительности  $\Delta$  при использовании типового автоколлиматора с малым угловым полем обеспечивается переотражением пучка [3], которое осуществляется дополнительным плоским зеркалом 3 (рис. 2а) с “выносом”<sup>1</sup> равным

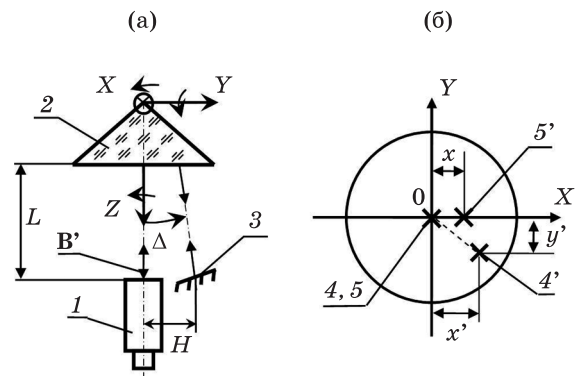
$$H = L \operatorname{tg} \Delta, \quad (1)$$

где  $L$  – дистанция измерений,  $\Delta = 2^{1.5} \delta n$  – угол между нормалью к плоскому зеркалу и оптической осью автоколлиматора,  $n$  – показатель преломления стекла ТО.

В автоколлимационной системе (рис. 2) отраженный ТО пучок по скручиванию минует приемный объектив и после отражения от зеркала вновь направляется на ТО. После повторного отражения от ТО в фокальной плоскости объектива автоколлиматора формируется изображение марки. Коллимационные углы измеряются по части пучка, отраженного от фронтальной грани ТО как от автоколлимационного зеркала. В результате на анализаторе системы, чувствительная площадка которого расположена в фокальной плоскости объектива, формируются два изображения марки (рис. 2б, поз. 4, 5). При повороте объекта, с которым связан ТО, на малые углы  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  относительно осей  $OX, OY, OZ$  изображения марок сместятся соответственно на величины  $y', x'$  и  $x$ , пропорциональные углам поворота [3].



**Рис. 1.** Тетраэдрический отражатель. 1, 2, 3 – отражающие грани (фронтальная грань номером не обозначена), стрелки  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  – положительное направление поворота ТО вокруг системы координат  $XYZ$  на соответствующие углы  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ .



**Рис. 2.** Схема системы с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания (а) и изображение марки на матрице (б). 1 – автоколлиматор, 2 – тетраэдрический отражатель, 3 – плоское зеркало, 4 и 5 – изображения марки при  $\Theta_1 = \Theta_2 = \Theta_3 = 0$ , 4' и 5' – изображения марки при  $\Theta_1 \neq \Theta_2 \neq \Theta_3 \neq 0$

<sup>1</sup> Под выносом понимается смещение элемента с оптической оси в передней главной плоскости объектива автоколлиматора.

Тогда для такой системы орты  $\mathbf{B}'$  и  $\mathbf{A}'$  отраженного пучка с учетом величин второго порядка малости будут определяться как

$$\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} 2\Delta\Theta_3 + \Delta^2\Theta_1 \\ \Delta\Theta_1^2 + \Delta\Theta_3^2 \\ 1 + 2\Theta_2^2 - 2\Theta_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 2\Theta_1 \\ -2\Theta_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) по величинам составляющих ортов  $B'_x$ ,  $A'_x$  и  $A'_y$ , пропорциональных смещениям изображений марок (рис. 2б), отражатель системы реализует независимые измерения угла скручивания  $\Theta_3$  и коллимационных углов  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  в соответствии с алгоритмами

$$\Theta_3 = B'_x / (2\Delta) = -x / (2\Delta f'), \quad (4)$$

$$\Theta_1 = -A'_y / 2 = -y' / (2f'), \quad \Theta_2 = A'_x / 2 = x' / (2f'). \quad (5)$$

Здесь  $f'$  – фокусное расстояние приемного объектива автоколлиматора;

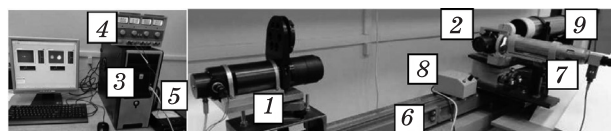
$x = p_x x'_{\text{МФП}}$ ,  $x' = p_x x'_{\text{МФП}}$ ,  $y' = p_y y'_{\text{МФП}}$ ;  $p_x$ ,  $p_y$  – горизонтальный и вертикальный размеры чувствительной площадки одного элемента матричного фотоприемника (МФП) с включенной зоной нечувствительности;

$x_{\text{МФП}}$  и  $x'_{\text{МФП}}$ ,  $y'_{\text{МФП}}$  – координаты изображения марки по углу скручивания и коллимационным углам на анализаторе.

При обработке видеокadra по алгоритмам (4), (5) определяются угловые перемещения контролируемого объекта по смещениям изображений марки на чувствительной площадке матричного анализатора, которые с точностью до постоянного коэффициента (равного фокусному расстоянию объектива автоколлиматора) равны координатам ортов отраженных пучков.

### Описание лабораторного стенда для исследования трехкоординатного цифрового автоколлиматора

В лаборатории кафедры ОЭПиС НИУ ИТМО разработан трехкоординатный цифровой автоколлиматор [3] для макета системы контроля угловых деформаций крупногабаритных объек-



**Рис. 3.** Стенд для исследования автоколлимационной системы. 1 – автоколлиматор, 2 – тетраэдрический отражатель на трехкоординатном поворотном столике, 3 – персональный компьютер, 4 – блок питания источника излучения автоколлиматора, 5 – миллиамперметр, 6 – оптическая скамья ОСК-2, 7 – визуальный автоколлиматор АКТ-15 с плоским зеркалом, 8 – блок питания источника излучения автоколлиматора АКТ-15, 9 – двухкоординатный автоколлиматор Trioptics с плоским зеркалом.

тов и собран стенд для его экспериментального исследования [4] (рис. 3).

Излучение от полупроводникового излучающего диода (ПИД), размещенного в фокальной плоскости объектива автоколлиматора 1 (рис. 3), распространяется до объекта, где отражается в ТО 2 для измерения угла скручивания. После переотражения плоским зеркалом объектив формирует изображения ПИД на матричном фотоприемнике. Для измерения коллимационных углов используется изображение ПИД, полученное за счет отражения от передней грани ТО 2. ТО установлен на поворотном столике, позволяющем задавать повороты относительно коллимационных осей  $OX$ ,  $OY$  на углы  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  и оси скручивания  $OZ$  на угол  $\Theta_3$ . Контроль коллимационных углов  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  и угла скручивания  $\Theta_3$  поворота ТО осуществляется устройствами контроля: автоколлиматором 9 с отражателем в виде плоского зеркала и визуальным автоколлиматором 7 соответственно. При повороте ТО регистрируемое смещение изображений на анализаторе автоколлиматора 1 пропорционально угловому повороту, который задается поворотным столиком. Далее на фотоприемнике автоколлиматора 1 происходит преобразование световых сигналов в электрические, которые поступают в вычислительное устройство на базе персонального компьютера 3, где происходит программная обработка данных.

В трехкоординатном цифровом автоколлиматоре был использован объектив с фокусным расстоянием 260 мм, в качестве анализатора – КМОП-матрица VEA/VIA-535 (производство ООО “ЭВС”, размер пиксела  $p_x = p_y = 5,55$  мкм при работе с разрешением  $1264 \times 960$ ) и инфра-

красный ПИД L-34F3C (фирма Kingbright, мощность излучения 80 мВт).

Реализована схема с переотражением пучка (рис. 2) с выносом  $H$  зеркала 100 мм, что на дистанции до ТО 1000 мм определяет угол  $\Delta = 0,1$  рад. При таком параметре  $\Delta$  отклонение  $\delta$  двугранных углов ТО от  $90^\circ$  соответствует  $0,023518$  рад ( $1^\circ 20' 20''$ ) для показателя преломления стекла марки К8  $n = 1,507792$  при  $\lambda = 950$  нм. Коэффициент передачи по углу скручивания в соответствии с выражением (4) задается как  $K = 2\Delta = 0,2$  и для коллимационных углов по выражению (5) –  $K_3 = 2$ .

Селекция изображений в плоскости анализа, соответствующих каналам измерения коллимационных углов и угла скручивания, выполняется по их размеру при обработке видеокadra с МФП. Поскольку ТО не эквивалентен плоскопараллельной пластине и изменяет расходимость пучка, используемого для измерения скручивания, соответствующее изображение на МФП по диаметру на 20 пикселей превосходит изображение, сформированное пучком, отраженным от фронтальной грани ТО.

Наличие двух изображений в плоскости анализа системы определяет возможность нарушения функционирования автоколлиматора при их перекрытии. Поскольку такие ситуации относительно редки (условие их возникновения определяется соотношением  $\Delta\Theta_3 = \Theta_2$  при  $\Theta_1 = 0$ ), это обстоятельство не ограничивает возможности практического использования рассматриваемого автоколлиматора.

Расчетный диапазон измерений автоколлиматора составит  $\pm 2,5^\circ$  для угла скручивания и  $\pm 15'$  для коллимационных углов. Используемые устройства контроля 7 и 9 в составе лабораторного стенда (рис. 3) обеспечивают задание угловых поворотов в канале измерения угла скручивания в диапазоне  $\pm 25'$  с точностью  $15''$  и в коллимационном канале в диапазоне до  $10'$  с точностью  $1,3''$ .

### Анализ составляющих суммарной погрешности измерений системы

Суммарную погрешность оптико-электронного прибора составляют погрешности, обусловленные методическими, технологическими и эксплуатационными факторами. Для нахождения предельного значения суммарной погрешности измерений автоколлиматора с учетом погрешностей устройств контроля выполнен анализ пер-

вичных погрешностей и получены соотношения для определения частичных погрешностей.

Специфической методической погрешностью измерения угла скручивания является погрешность вследствие влияния коллимационных углов, определяемая из выражений (2) и (4), –

$$\Delta\Theta_{3м} = (\Delta\Theta_1)/2. \quad (6)$$

При диапазоне измерений  $\Theta_{1\max} = 10'$  максимальное значение этой погрешности составляет  $1,45 \times 10^{-4}$  рад ( $30''$ ). Данная методическая погрешность носит систематический характер и автоматически устраняется при вычислении угла скручивания путем введения соответствующей поправки по результатам измерения коллимационного угла  $\Theta_1$ .

Выражения для определения других частичных погрешностей измерений автоколлиматора можно получить дифференцированием алгоритмов (4) и (5) определения углов поворота отражателя, которые задают статическую характеристику измерительной системы.

Получено, что частичные погрешности измерения определяются следующими первичными погрешностями: погрешностью фокусного расстояния объектива автоколлиматора  $df'$  и погрешностями, вызванными отклонениями показателя преломления стекла ТО  $dn$  и отступления двугранных углов ТО  $d\delta$ , а также вызванными неточным измерением координаты изображения марки на поверхности КМОП-матрицы  $dx$ .

Частичная погрешность измерений автоколлиматора из-за отклонения фокусного расстояния объектива от номинального значения задается выражением

$$d\Theta_{df'} = -x df' / (f^2 K) = -\Theta_{\max} df' / f', \quad (7)$$

где  $K$  – коэффициент передачи соответственно по углу скручивания и коллимационным углам.

Фокусное расстояние объектива автоколлиматора может быть измерено с относительной погрешностью  $\sigma_{f'} = df' / f' = 0,12\%$  [5]. Тогда при максимальных задаваемых значениях углов поворота контролируемого объекта, равных  $\Theta_{1\max} = \Theta_{2\max} = 10'$  и  $\Theta_{3\max} = 25'$ , предельное значение частичной погрешности измерений автоколлиматора из-за отклонения фокусного расстояния объектива в коллимационном канале составит  $0,7''$  и  $1,8''$  – в канале измерения угла скручивания.

Частичные погрешности измерения, вызванные отклонениями показателя преломления  $dn$  стекла ТО и отступлениями  $d\delta$  двугранных углов ТО, присутствуют только в канале измерения угла скручивания автоколлиматора в соответствии с алгоритмом (4), в котором коэффициент преобразования  $K$  задается как  $K = 2\Delta = 2^{2,5}\delta n$ .

Тогда

$$d\Theta_{3dn} = -x dn / (4\sqrt{2}\delta n^2 f') = -\Theta_{3\max} dn / n, \quad (8)$$

$$d\Theta_{3d\delta} = -x d\delta / (4\sqrt{2}n\delta^2 f') = -\Theta_{3\max} d\delta / \delta. \quad (9)$$

Так как  $d\delta = 4''$ ,  $dn = 10^{-3}$ , то для стекла категории и класса однородности партии по показателю преломления (4В)  $d\Theta_{3dn} = 0,99''$  и  $d\Theta_{3d\delta} = 1,24''$ .

Найденные предельные значения частичных погрешностей измерений автоколлиматора являются систематическими и могут быть скомпенсированы при предварительной калибровке.

Допустимая погрешность измерения угла  $d\Theta$  из-за неточного измерения координаты изображения марки на поверхности КМОП-матрицы в соответствии с алгоритмами (4) и (5) определяется выражением

$$d\Theta_{dx} = dx / (Kf'). \quad (10)$$

Здесь  $d\Theta$  может рассматриваться как пороговая чувствительность измерения угла  $\Theta$ , а  $dx$  – как погрешность, с которой в результате обработки видеокadra, сформированного матричным анализатором, определяется смещение изображения.

Погрешность измерения координаты точечного изображения на площадке матрицы ПЗС или КМОП-матрицы при достаточно большой облученности изображения составляет 0,03–0,05 от размера элемента (пиксела) ПЗС или КМОП-матрицы [6].

Тогда для измерительной системы согласно (10) теоретическая пороговая чувствительность составит 0,1'' для коллимационных углов и 1'' для угла скручивания.

К одной из составляющих суммарной погрешности можно отнести и частичную погрешность, вызванную случайной погрешностью задания угловых поворотов контролируемого объекта. В канале измерения угла скручивания она составляет 15'', в коллимационном канале – 1,3''.

Большинство первичных погрешностей являются систематическими, но их значение чаще

всего неизвестно, поэтому они учитываются как случайные с полем рассеяния, равным допуску на рассматриваемый параметр. Методическую погрешность влияния коллимационных углов в канале измерения угла скручивания будем считать скомпенсированной после введения поправки.

Считая рассмотренные частичные погрешности статистически независимыми, суммарные погрешности для канала измерения угла скручивания и коллимационного канала можно определить как

$$d\Theta_3 = \sqrt{d\Theta_{3df'}^2 + d\Theta_{3dn}^2 + d\Theta_{3d\delta}^2 + d\Theta_{3dx}^2 + d\Theta_{3\text{зад}}^2}, \quad (11)$$

$$d\Theta_{1,2} = \sqrt{d\Theta_{1,2df'}^2 + d\Theta_{1,2dx}^2 + d\Theta_{1,2\text{зад}}^2}. \quad (12)$$

Расчет по (11) и (12) дает следующие значения суммарной погрешности в канале измерения угла скручивания и коллимационном канале:  $d\Theta_3 = 15,2''$ ,  $d\Theta_{1,2} = 1,5''$ .

Полученное значение для погрешности измерения коллимационных углов с помощью предложенного трехкоординатного автоколлиматора соответствует погрешности измерения серийно выпускаемых двухкоординатных автоколлиматоров для контроля угловых деформаций элементов объектов, которая в зависимости от фокусного расстояния автоколлиматора находится в диапазоне от 2,5'' до 0,2''. Значительное превышение суммарной погрешности измерения угла скручивания по сравнению с погрешностью измерения в коллимационном канале объясняется большей погрешностью задания угловых поворотов контрольного элемента вокруг оси скручивания.

### Контроль параметров стабилизации автоколлиматора

Проведение исследований трехкоординатного цифрового автоколлиматора целесообразно начать с контроля стабильности прибора. Условия стабильности измерительных (статических) характеристик прибора связаны с геометрической деформацией ПЗС- и КМОП-матриц вследствие нагрева в процессе работы [7]. Особое влияние на стабильность всей измерительной системы оказывают изменяющиеся внешние условия, а именно угловые смещения всего измерительного комплекса, вызванные постоянными вибрациями и деформациями.

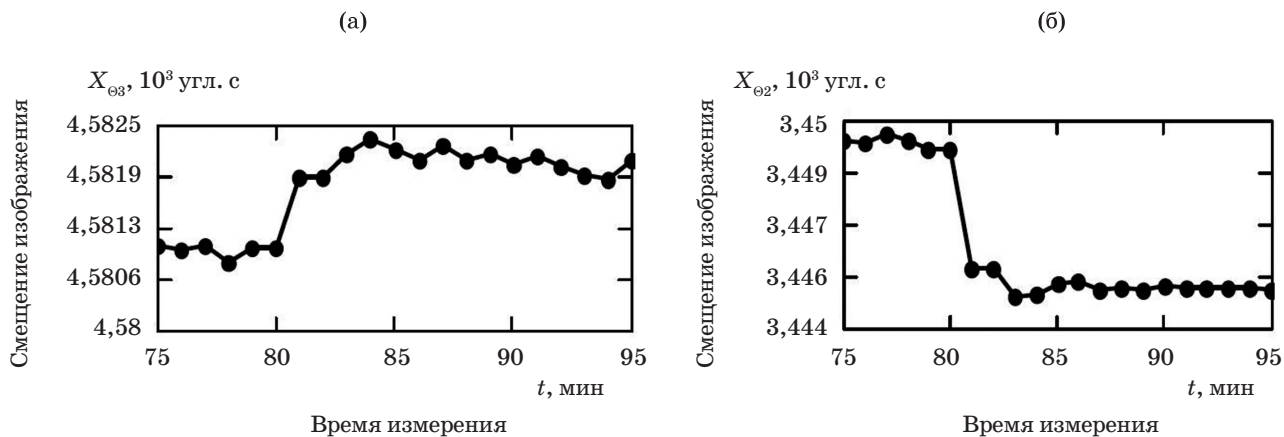


Рис. 4. Воспроизводимость результатов измерений в канале скручивания (а) и в коллимационном канале (б).

Для контроля стабильности параметров предлагается фиксировать текущее значение координат по осям  $X$  и  $Y$  для каждого измерительного канала системы и методом наименьших квадратов вычислять функцию линейной регрессии (тренд) за период измерений в течение 10 мин при нулевом угловом положении КЭ, что позволит оценить стабильность конструкции автоколлиматор-контрольный элемент измерительного канала.

На рис. 4 приведены зависимости воспроизводимости результатов измерения смещения изображения для различных каналов на последних стадиях стабилизации в интервале 75–95 мин после включения прибора.

На последних 10 мин измерений значение трендов по направлениям  $X$ ,  $Y$  для коллимационного канала не превышает 0,005 угл.с/мин, что соответствует среднеквадратическому отклонению (СКО) результатов измерений, равному 0,05",

Таблица 1. Результаты измерений в коллимационном канале измерительной системы

Параметр, единицы измерения	Значение
Диапазон измерений, угл. мин	10
Теоретический коэффициент передачи зеркала $K_3$	2
Экспериментальный коэффициент передачи зеркала $K_{3э}$	2,163
Среднеквадратическое значение погрешности измерения коллимационного угла $\sigma_{02}$ , угл. с	1,4

а для канала угла скручивания – 0,05 угл.с/мин с СКО результатов измерений, равному 0,5".

Полученные в ходе контроля стабилизации значения СКО измеренных координат задают пороговую чувствительность измерительной системы и не превышают теоретические значения чувствительности, полученные по методике, изложенной в [6]. Следовательно, измерительная система стабилизируется за время  $t < 100$  мин с максимальным разбросом результатов измерений в канале угла скручивания, равным  $\pm 0,5''$ , и в коллимационном канале – 0,05".

### Контрольные измерения

При измерениях на стенде (рис. 3) проводились

контроль углов скручивания в диапазоне  $\pm 25'$  и коллимационных углов в диапазоне до  $10'$  на дистанции в 1 м,

снятие статической характеристики системы, определение коэффициента передачи ТО по измеренным углам и среднеквадратической погрешности измерения.

В эксперименте определяются координаты энергетического центра изображения на анализаторе системы, получаемого в количестве элементов матрицы. Для этого были найдены координаты центра изображения по положению элемента с максимальной облученностью. В ходе измерений накапливается массив значений координат  $X$  и  $Y$  энергетического центра изображения, которые пересчитываются в угловые отклонения пучка, отраженного контрольным элементом.

Обработка накопленного массива экспериментальных данных для каждого из измерительных каналов проводится методом линейной регрессии, поскольку исследуемая система не является сертифицированным средством измерения. Статическая характеристика системы в каждом измерительном канале задается уравнением полученной кривой линейной регрессии по совокупности отсчетов устройства контроля ( $\Theta$ ) и исследуемой системы ( $X$  и  $Y$ ). Коэффициент при линейном члене регрессии является оценкой коэффициента передачи по коллимационному углу и углу скручивания. Случайная погрешность измерений находится как СКО измеренных угловых отклонений от регрессионной кривой.

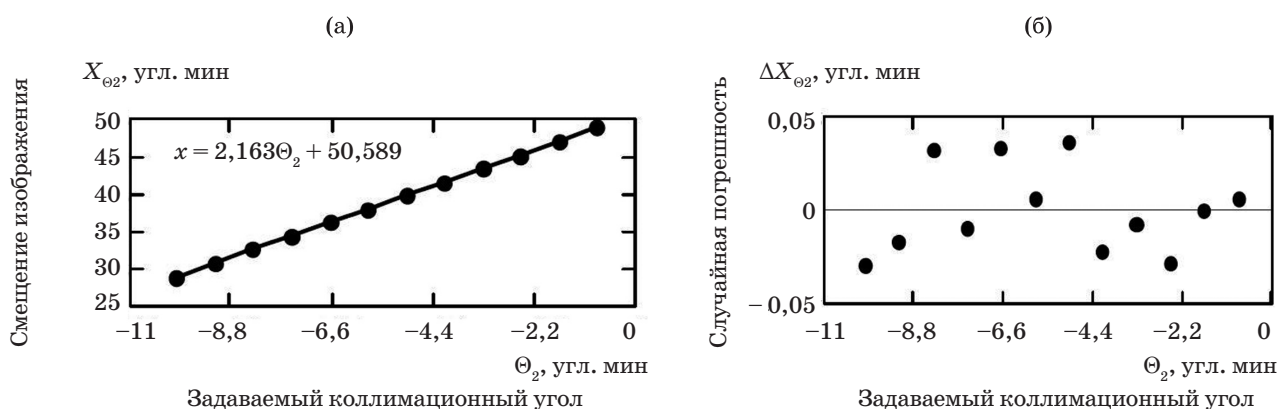
Результаты обработки экспериментальных данных в коллимационном канале по регрессионной кривой  $x = 2,163\Theta_2 + 50,589$  в зависимости от отсчета  $\Theta_2$  задаваемого поворота КЭ относительно коллимационной оси  $OY$  по устройству контроля приведены на рис. 5 и

**Таблица 2.** Результаты измерений в канале скручивания измерительной системы

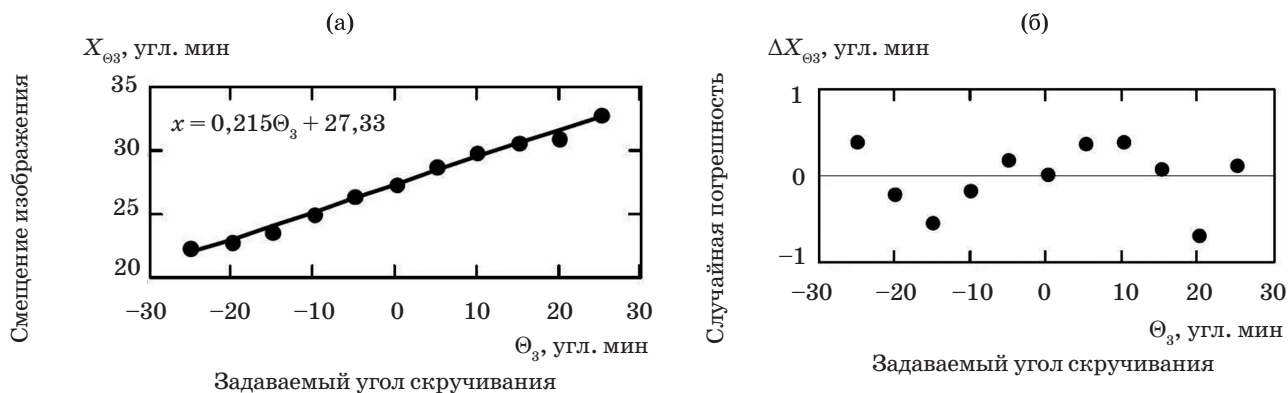
Параметр, единицы измерения	Значение
Диапазон измерений, угл. мин	$\pm 25$
Теоретический коэффициент передачи КЭ по скручиванию $K$	0,2
Экспериментальный коэффициент передачи ТО по каналу скручивания $K_3$	0,215
Среднеквадратическое значение погрешности измерения угла скручивания $\sigma_{\Theta_3}$ , угл. с	20

в табл. 1. Среднеквадратическое значение погрешности  $\sigma$  составило  $1,4''$ .

Эксперименты проводились без предварительной калибровки объектива, что при технологической погрешности фокусного расстояния



**Рис. 5.** График статической характеристики системы (а) и распределение случайной погрешности измерения угловых отклонений (б) по коллимационным углам  $\Theta_2$ .



**Рис. 6.** График статической характеристики системы (а) и распределение случайной погрешности измерения угловых отклонений (б) по углам скручивания  $\Theta_3$ .

$\sigma_f = df'/f' = 8-10\%$  [5] определяет полученное в результате эксперимента отклонение крутизны статической характеристики для плоского зеркала ( $K_{3a} = 2,163$ ) от теоретического значения ( $K_3 = 2$ ).

Для совокупности измерений в канале скручивания результаты обработки экспериментальных данных по регрессионной кривой  $x = 0,215\Theta_3 + 27,33$  в зависимости от отсчета  $\Theta_3$  задаваемого поворота КЭ относительно оси скручивания  $OZ$  по устройству контроля приведены на рис. 6 и в табл. 2. Среднеквадратическое значение погрешности  $\sigma$  составило  $20''$ .

Экспериментальные среднеквадратические значения погрешности измерения согласуются с расчетной суммарной погрешностью в канале измерения угла скручивания и коллимационном канале.

## Заключение

В ходе экспериментальных исследований трехкоординатного цифрового автоколлиматора доказана линейность статической характеристики автоколлимационной системы. При этом оценка среднеквадратического значения погрешности  $\sigma$  составила  $20''$  при измерении угла скручивания в диапазоне  $\pm 25'$  и  $1,4''$  – при измерении коллимационных углов в диапазоне до  $10'$ . Полученные метрологические характеристики соответствуют требуемым для систем измерения угловых деформаций элементов конструкции крупногабаритных объектов, в частности зеркал современных радиотелескопов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.132.21.1437).

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бондаренко И.Д.* Принципы построения фотоэлектрических автоколлиматоров. Минск: Изд-во “Университетское”, 1984. 190 с.
2. *Коняхин И.А., Панков Э.Д.* Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры. Справочник. М.: Недра, 1991. 224 с.
3. *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.
4. *Тургалиева Т.В., Коняхин И.А.* Исследование автоколлимационной системы измерения угловых деформаций крупногабаритных объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 150–151.
5. *Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А.* Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974. 333 с.
6. *Андреев А.Л., Бурдова Н.А., Коротаев В.В.* Алгоритм пространственно-временной селекции сигналов в адаптивных системах наблюдения за подвижными объектами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 4 (74). С. 11–16.
7. *Королев А.Н., Гарцуев А.И.* Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС-матрице // Измерительная техника. 2004. №5. С. 20–22