

ЦИФРОВОЙ АВТОКОЛЛИМАТОР

© 2009 г. А. Н. Королев**, доктор техн. наук; А. И. Гарцуев**; Г. С. Полищук*;
В. П. Трегуб*, канд. техн. наук

* ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

** ООО “Оптротех”, Санкт-Петербург

В статье представлена информация о разработке и исследовании цифрового двухкоординатного автоколлиматора с использованием в качестве фотоприемного и измерительного элемента ПЗС-матрицы. Показано, что погрешность калибровки на краю диапазона $\pm 8'$ составляет 0,05"; получена верхняя метрологическая оценка точности, которая не превышает 0,1".

Ключевые слова: измерение плоского угла, автоколлиматор, ПЗС-камера, калибровка.

Коды OCIS: 120.3930, 230.5160.

Поступила в редакцию 17.05.2009.

Автоколлиматоры широко используются во многих задачах угловых измерений [1]. Особо важными являются точные угловые измерения для технологий, связанных с разработкой и созданием систем навигации и ориентации, в том числе точных гироскопов, кодовых датчиков угла, авиационных, космических и морских систем навигации и астроориентации, а также при создании крупногабаритных оптических систем и большебазных интерферометров.

В современных прецизионных автоколлиматорах в качестве фотоприемного устройства широко используются матричные фотоприемники – ПЗС-линейки и матрицы, поскольку это уникальные приборы, которые, формируя информационный сигнал, одновременно являются и измерительной шкалой [2–4].

Так, например, фирма “TRIOPTICS” (Германия) выпускает на ПЗС-матрицах серию двухкоординатных автоколлиматоров “TRIANGLE” с фокусными расстояниями от 100 до 1000 мм, разрешением от 0,1" до 0,01" и погрешностью от 2,5" до 0,2".

Фирма “MOELLER-WEDEL” (Германия) выпускает прецизионные метрологические двухкоординатные автоколлиматоры “ELCOMAT 3000” и “ELCOMAT HR” с использованием ПЗС-линеек с разрешением до 0,005" и погрешностью от 0,1" до 0,01".

В статье представлена конкурентоспособная отечественная разработка, выполненная сотрудниками ОАО “ЛОМО” и ООО “Оптротех”, циф-

рового автоколлиматора (далее по тексту ЦАК) с использованием в качестве фотоприемного и измерительного элемента телевизионной камеры на основе ПЗС-матрицы.

Основные технические характеристики цифрового двухкоординатного автоколлиматора:

дискретность выходных данных – от 0,1" до 0,001",

диапазоны измерений угла – $\pm 10'$ по горизонтальной оси и $\pm 7'$ по вертикальной оси,

среднеквадратическое отклонение (СКО) результатов измерения углов по каждой из осей в пределах диапазона измерений не более $\pm 0,01"$ при цикле накопления не более 10 с,

полная погрешность измерений в нормальных условиях в диапазоне измерений угла $\pm 5'$ – не более $\pm 0,1"$,

фокусное расстояние объектива – 500 мм, диаметр выходного зрачка объектива – 50 мм.

Оптическая схема и методика расчета угловых смещений

Оптическая схема автоколлиматора приведена на рис. 1. Лучи от автоколлимационной марки (перекрестья) 2, освещенной светодиодом 1 (L-793SRD-H, красный [5]), отразившись от светоделителя 4, выходят из объектива 5 параллельным пучком; отразившись от плоского зеркала 6 (угол отклонения α которого измеряется), в обратном ходе через объектив 5 и светоделитель 4 формируют автоколлимационное изображение

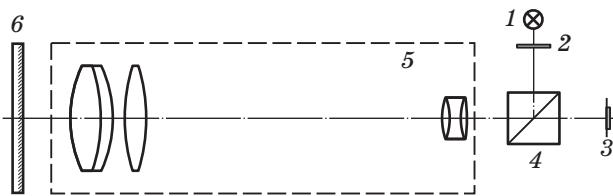


Рис. 1. Оптическая схема автоколлиматора. 1 – светодиод, 2 – автоколлимационная марка, 3 – ПЗС-матрица, 4 – светоделитель, 5 – объектив, 6 – плоское зеркало.

перекрестья на ПЗС-матрице 3 камеры “Видеоскан-415” [6].

При повороте нормали зеркала относительно оптической оси автоколлиматора на угол α отраженные от зеркала лучи поворачиваются на двойной угол 2α относительно оптической оси, соответственно, изображение перекрестья в плоскости ПЗС-матрицы изменяет свое положение. Измеренное в пикселях смещение перекрестья пересчитывается в величину угла поворота α в угловых секундах по формуле

$$\alpha = \frac{1}{k} \frac{Sd}{2F} \frac{180 \times 60 \times 60}{\pi}, \quad (1)$$

где d – размер светочувствительных элементов матрицы, F – фокусное расстояние объектива, k – калибровочный коэффициент, S – линейное смещение изображения перекрестья на ПЗС-матрице в пикселях, определяемое выражением

$$S = \sqrt{(C_x - C_{x=0})^2 + (C_y - C_{y=0})^2}. \quad (2)$$

Вычисление координат центра тяжести изображения перекрестья производится в соответствии с выражениями:

$$C_x = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} n}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}}, \quad C_y = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} m}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}}, \quad (3)$$

где C_x, C_y – координаты центра тяжести по осям X и Y соответственно; $I_{n,m}$ – элементы матрицы яркостей; N, M – число столбцов и строк матрицы яркостей; n, m – порядковые индексы по столбцам и строкам матрицы.

В формуле (1) номинальные конструктивные параметры $F = 500$ мм, размеры пикселя $d_x \times d_y = 8,3 \times 8,3$ мм.

Для обеспечения точного перевода линейных смещений изображения перекрестья на ПЗС-матрице в угловую величину выполняется калибровка прибора, при этом определяется фактическое значение калибровочного коэффициента k . По сути, целью калибровки является уточнение номинальных конструктивных параметров d и F в формуле (1).

Работа с автоколлиматором осуществляется с помощью персонального компьютера и специализированной программы “Автоколлиматор”. На рис. 2 приведены основные окна программы “Автоколлиматор”. Рабочее пространство пан-

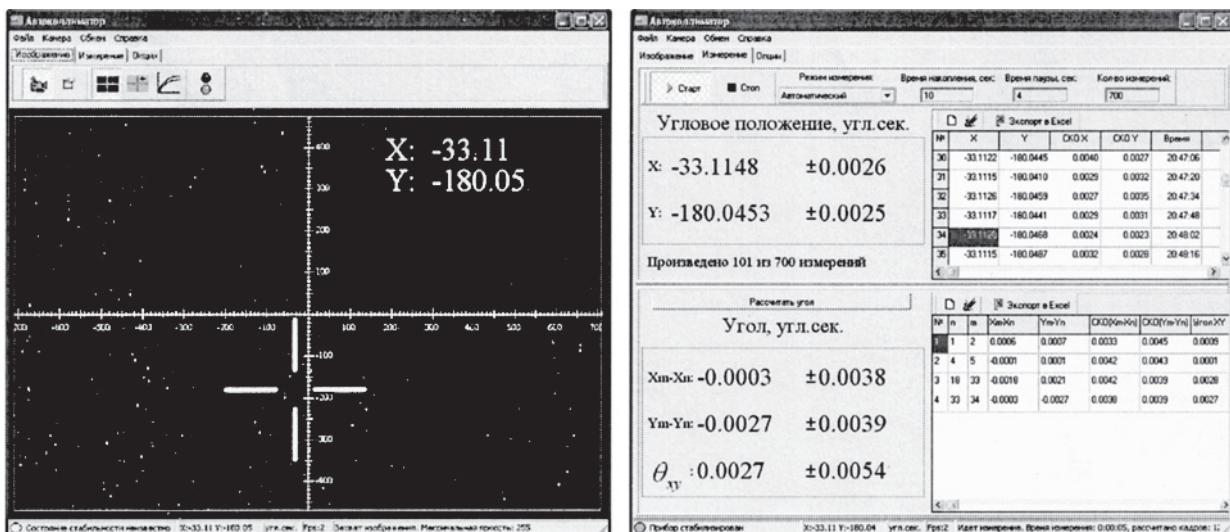


Рис. 2. Основные окна программы “Автоколлиматор”.

ли “Измерение” (рис. 2) делится на две панели: панель измерения угловой координаты и панель измерения угла. Программа позволяет задавать различные параметры: выбирать единицы измерения, цену деления шкалы, разрешение (точность измерений), значение фокусного расстояния объектива, калибровочные коэффициенты для осей X и Y , осуществлять настройку камеры (экспозиция и усиление).

Контроль параметров стабилизации прибора

Реализована функция контроля стабилизации прибора. Оценка условий стабилизации измерительных характеристик прибора связана с необходимостью контроля геометрической деформации ПЗС-матрицы вследствие прогрева в процессе работы и выработкой критерия, необходимого и достаточного для утверждения о стабилизации ПЗС-матрицы.

Предварительные исследования показали, что время стабилизации ПЗС-матриц составляет порядка 90–100 мин [7, 8].

Для контроля стабильности прибора измеряются текущие значения угловой координаты по осям X и Y и методом наименьших квадратов вычисляется функция линейной регрессии (тренд) за период измерений 10 мин.

Значение тренда является основным критерием для принятия решения о стабилизации прибора. Очевидно, что это значение зависит от требований к точности измерений. Например, если эти значения меньше 0,0005 угл.с/мин по обоим направлениям, то это означает, что в течение 20 мин погрешность, связанная с трендом, не превысит 0,01''. Стабилизация прибора контролировалась с помощью указанной процедуры при использовании в качестве отражателя призмы БКР-180° (световозвращатель, трипель-призма). Пороговое значение тренда было установлено равным 0,0002 угл.с/мин.

В табл. 1 приведены результаты измерений на последней стадии стабилизации в интервале 60–72 мин после включения программы.

СКО результатов приведенной серии измерений составляет для направлений по осям X и Y 0,0003'' и 0,0008'' соответственно. На последних 10 минутах значение трендов по обоим направлениям не превышает установленный порог. На 73-й минуте программа выводит сообщение “Прибор стабилизирован”.

Таким образом, измерительная часть прибора стабилизируется за время $t < 100$ мин. Разброс

Таблица 1. Воспроизводимость результатов измерений при достижении условий стабилизации

$t, *$ мин	X , угл. с	Y , угл. с	Тренд по оси x	Тренд по оси y
60	-26,492	-104,030	-0,000959	0,000441
61	-26,492	-104,030	-0,000642	0,000551
62	-26,492	-104,031	-0,000305	0,000546
63	-26,492	-104,031	-0,000147	0,000187
64	-26,492	-104,030	-0,000110	0,000148
65	-26,492	-104,032	-0,000091	0,000135
66	-26,492	-104,032	-0,000077	0,000106
67	-26,493	-104,029	-0,000062	0,000067
68	-26,492	-104,030	-0,000065	0,000010
69	-26,491	-104,032	-0,000006	0,000070
70	-26,492	-104,031	-0,000015	0,000038
71	-26,492	-104,032	0,000025	0,000039
72	-26,492	-104,032	0,000022	0,000062

* t – время с момента включения камеры и программы.

результатов измерений по завершению стабилизации составляет $\pm 0,001''$. Однако следует иметь в виду, что если в качестве отражателя используется не призма БКР-180°, а зеркало, то решающее значение будет иметь стабильность всей конструкции “автоколлиматор–зеркало”.

Калибровка прибора

Калибровка прибора проводилась с использованием прецизионного углоизмерительного стола (УС), на поворотной части которого было установлено плоское зеркало. СКО результатов измерений при такой установке зеркала значительно превышает СКО при использовании призмы БКР-180°. Поэтому для калибровки и измерения был использован метод совокупных измерений с оценкой линейной регрессии. Такой метод позволяет уменьшить влияние случайных погрешностей, связанных с механической нестабильностью стендов.

Совместные исследования УС и ЦАК позволяют сделать вывод о близости их метрологических параметров в части измерения угловой координаты.

Для каждого направления (по осям X , Y) было проведено по 2 цикла измерений.

В табл. 2 приведены результаты 1-го цикла измерений угла при повороте зеркала, установленного на УС для направления по оси X .

На рис. 3 приведен график линейной регрессии по совокупности взаимных отсчетов УС и ЦАК (столбцы 2 и 3) для цикла $X1$. Коэффициент

Таблица 2. Совокупность отсчетов при калибровке для направления по оси X

Номер измерения	УС	ЦАК	Расчет по тренду	$X - X'_\theta$, угл. с
	θ , угл. с	X , угл. с	X_θ , угл. с	
1	2	3	4	5
1	49,42	515,454	515,569	-0,115
2	100,12	464,532	464,462	0,070
3	151,00	413,220	413,173	0,047
4	200,45	363,301	363,326	-0,025
5	251,64	311,647	311,725	-0,078
6	300,48	262,512	262,493	0,019
7	350,96	211,549	211,608	-0,059
8	414,31	147,830	147,749	0,081
9	451,82	109,988	109,938	0,050
10	500,53	60,845	60,837	0,008
11	551,86	9,208	9,094	0,114
12	601,20	-40,673	-40,642	-0,031
13	650,85	-90,696	-90,690	-0,006
14	700,30	-140,562	-140,538	-0,024
15	751,97	-192,651	-192,622	-0,029
16	801,79	-242,839	-242,843	0,004
17	855,49	-296,949	-296,974	0,025
18	901,36	-343,199	-343,212	0,013
19	952,11	-394,397	-394,370	-0,027
20	1000,37	-442,939	-443,017	0,078
21	1052,05	-495,222	-495,112	-0,110
СКО		0,061		

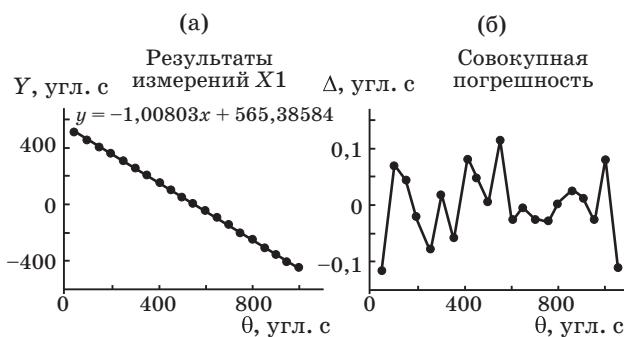


Рис. 3. а – график линейной регрессии по совокупности взаимных отсчетов УС (θ) и ЦАК (X), б – график совокупной погрешности (Δ) для цикла калибровки $X1$.

при линейном члене регрессии является оценкой калибровочного коэффициента.

В столбце 4 табл. 2 приведены результаты расчета по формуле регрессии $y = -1,00803x + 565,38584$, где x – отсчеты УС, а в столбце 5 –

разность между реальными измерениями ЦАК и результатами расчета по функции регрессии. Значения в столбце 5 могут рассматриваться как совокупная погрешность калибровки, определяемая метрологическими параметрами двух приборов. Внизу таблицы приведена совокупная погрешность в форме СКО, равная $0,061''$. График совокупной погрешности для цикла $X1$ также приведен на рис. 3.

Для второго цикла измерений $X2$ была получена формула регрессии $y = -1,00797x + 565,42955$, где x – отсчеты УС, а совокупная погрешность в форме СКО составила $0,049''$.

Значение калибровочного коэффициента для направления по оси X принимаем равным среднему значению из двух циклов, а именно

$$k_X = (1,00803 + 1,00799)/2 = 1,00801.$$

Совокупная погрешность в форме СКО порядка $0,05''$ для двух приборов близкого уровня точности является хорошим показателем качества измерений.

Для калибровки по направлению оси Y труба автоколлиматора была развернута на 90° , при этом диапазон изменения отсчетов для направления по оси X не превышал $0,5''$.

В табл. 3 приведены результаты 1-го цикла измерений угла при повороте зеркала, установленного на УС, для направления по оси Y .

На рис. 4 приведен график линейной регрессии по совокупности взаимных отсчетов УС и ЦАК для цикла $Y1$.

Таблица 3. Совокупность отсчетов при калибровке для направления по оси Y

Номер измерения	УС	ЦАК	Расчет по тренду	$Y - Y'_\theta$, угл. с
	θ , угл. с	Y , угл. с	Y_θ , угл. с	
1	200,56	312,419	312,407	0,012
2	250,69	262,009	261,879	0,130
3	300,52	211,616	211,652	-0,036
4	352,11	159,669	159,652	0,017
5	407,67	103,597	103,651	-0,054
6	453,17	57,670	57,789	-0,119
7	501,29	9,221	9,286	-0,065
8	552,24	-42,092	-42,069	-0,023
9	600,71	-90,897	-90,924	0,027
10	652,26	-142,957	-142,884	-0,073
11	702,68	-193,504	-193,705	0,201
12	800,52	-292,360	-292,323	-0,037
СКО		0,089		

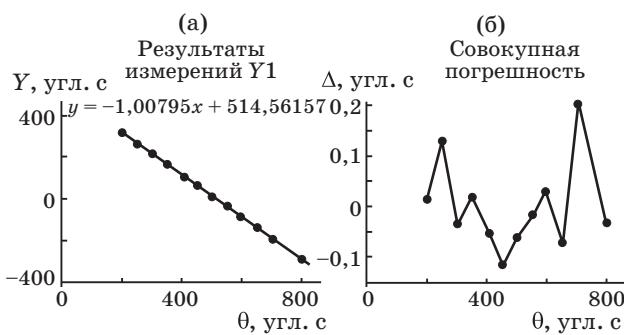


Рис. 4. а – график линейной регрессии по совокупности взаимных отсчетов УС (θ) и ЦАК (Y), б – график совокупной погрешности (Δ) для цикла калибровки $Y1$.

В столбце 4 табл. 3 приведены результаты расчета по формуле регрессии $y = -1,00795x + 514,56157$, где x – отсчеты УС, а в столбце 5 – разность между реальными измерениями ЦАК и результатами расчета по функции регрессии. Внизу таблицы приведена совокупная погрешность в форме СКО, равная $0,089''$. График совокупной погрешности для цикла $Y1$ приведен также на рис. 4.

Для второго цикла измерений $Y2$ была получена формула регрессии $y = -1,00813x + 514,71177$, где x – отсчеты УС, а совокупная погрешность в форме СКО составила $0,055''$.

Значение калибровочного коэффициента для направления по оси Y принимаем равным среднему значению из двух циклов, а именно

$$k_Y = (1,00795 + 1,00813)/2 = 1,00804.$$

Близость калибровочных коэффициентов, СКО совокупной погрешности порядка $0,05''$ и диапазон совокупной погрешности менее $0,1''$ для обоих направлений также являются подтверждением высокого качества измерений.

Контрольные измерения

После ввода в программу калибровочных коэффициентов были выполнены контрольные измерения. Поскольку УС не является сертифицированным средством измерения угла, контрольные измерения также проводились с использованием регрессионного анализа совокупных результатов измерений.

В табл. 4 приведены результаты контрольных измерений угла при повороте зеркала, установленного на УС, для направления по оси X .

Таблица 4. Контрольные измерения для направления по оси X

Номер измерения	УС	ЦАК	Расчет по тренду	$X - X'_\theta$, угл. с
	θ , угл. с	X , угл. с	X_θ , угл. с	
1	50,76	505,622	505,695	-0,073
2	152,03	404,442	404,417	0,025
3	252,61	303,814	303,829	-0,015
4	353,65	202,767	202,781	-0,014
5	452,41	104,042	104,013	0,029
6	552,48	4,001	3,935	0,066
7	652,21	-95,771	-95,803	0,032
8	750,85	-194,377	-194,451	0,074
9	852,23	-295,891	-295,839	-0,052
10	951,99	-395,656	-395,607	-0,049
11	1052,00	-495,655	-495,625	-0,030
		СКО	0,049	

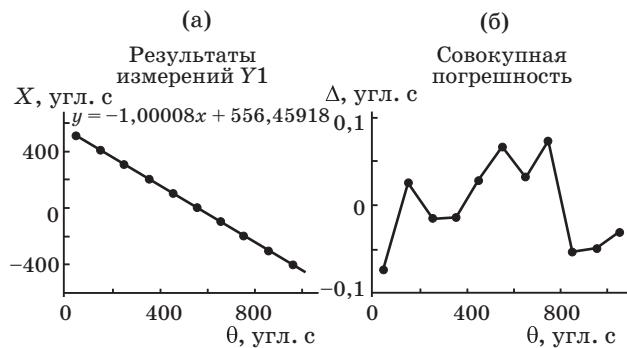


Рис. 5. а – график линейной регрессии по совокупности взаимных отсчетов УС (θ) и ЦАК (X), б – график совокупной погрешности (Δ) для результатов контрольных измерений в направлении оси X .

На рис. 5 приведен график линейной регрессии по совокупности взаимных отсчетов УС и ЦАК (столбцы 2 и 3) для результатов измерений в направлении оси X .

В столбце 4 табл. 4 приведены результаты расчета по формуле регрессии $y = -1,00008x + 556,71177$, где x – отсчеты УС, а в столбце 5 – разность между реальными измерениями ЦАК и результатами расчета по функции регрессии. Внизу таблицы приведена совокупная погрешность в форме СКО, равная $0,049''$. График совокупной погрешности для измерений в направлении оси X приведен также на рис. 5.

Для совокупности измерений в направлении оси Y была получена формула регрессии $y = -0,9999x + 510,56146$, где x – отсчеты УС, а

в столбце 5 – разность между реальными измерениями ЦАК и результатами расчета по функции регрессии. Совокупная погрешность в форме СКО составила $0,048''$.

Заключение

Проведенные исследования и измерения позволяют сделать следующие выводы:

1. В соответствии с формулами линейной регрессии для контрольных измерений коэффициенты при линейном члене отличаются от 1 не более чем на $\pm 0,0001$. Это означает, что погрешность калибровки на краю контрольного диапазона $\pm 8'$ не превышает $0,05''$, а в диапазоне $\pm 1' - 0,006''$.

2. Для обоих направлений совокупная погрешность в форме СКО не превышает $0,05''$.

3. Для обоих направлений максимальный размах совокупной погрешности не превышает $\pm 0,08''$.

4. Как следствие, полная погрешность цифрового двухкоординатного автоколлиматора не превышает $0,1''$. При этом следует отметить, что это лишь верхняя метрологическая оценка точности прибора, привязанная к использованному средству измерений – углоизмерительному столу.

Приведенные выводы говорят о высоких достигнутых характеристиках цифрового двух-

координатного автоколлиматора и соответствии его мировому уровню современных требований для данного класса приборов, а вынужденная косвенная оценка точностных характеристик с использованием углоизмерительного стола ставит вопрос о необходимости развития адекватных средств метрологического обеспечения для таких приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высокоточные угловые измерения / Под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
3. Однокоординатный фотоэлектрический автоколлиматор. Проспект НПК "ТОИ им. С.И. Вавилова".
3. Проспект фирмы "TRIOPTICS" (Германия).
4. Проспект фирмы "MOELLER-WEDEL" (Германия).
5. Проспект фирмы "Kingbright" (США).
6. Проспект НПК "Видеоскан" (Россия).
7. Королев А.Н., Гарцуев А.И. Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС-матрице // Измерительная техника. 2004. № 5. С. 20–22.
8. Королев А.Н., Гарцуев А.И. Цифровой двухкоординатный автоколлиматор с разрешением $0,001$ угловых секунды // Измерительная техника. 2004. № 12. С. 29–32.