

УДК 531.748

Малогабаритный двухкоординатный цифровой автоколлиматор

© 2019 г. **Ю. П. Жуков; И. Л. Ловчий, канд. физ.-мат. наук;
Ю. И. Пестов; В. А. Сергеев; Б. Г. Страдов**

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

E-mail: contact@niiop.ru

Поступила в редакцию 01.04.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-08-25-28

В работе описан малогабаритный двухкоординатный фотоэлектрический цифровой автоколлиматор, выполненный с использованием одного линейного фоточувствительного прибора с зарядовой связью и автоколлимационной марки специального вида. Автоколлиматор позволяет измерять углы в горизонтальной и вертикальной плоскостях в диапазоне $\pm 10'$. При этом предельная погрешность измерения угла в горизонтальной плоскости не превышает $\pm 0,7''$, а в диапазоне измерения углов $\pm 7,5'$ — не превышает $\pm 0,5''$. Предельная погрешность измерения угла в вертикальной плоскости не превышает $\pm 5''$. Частота выдачи автоколлиматором цифровых данных измерения углов — 30 Гц.

Ключевые слова: цифровой автоколлиматор, измерение угла, автоколлимационная марка, линейный прибор с зарядовой связью.

Коды OCIS: 120.0120, 120.4640, 120.1680.

Цифровые автоколлиматоры широко используются в науке и технике для высокоточных бесконтактных угловых измерений как самостоятельно, так и в составе сложных систем, предназначенных для навигации и ориентации, передачи направления, автоматической юстировки и т.д. При этом, в случае использования в составе мобильных устройств, автоколлиматоры, как правило, должны иметь малые габариты и повышенную надёжность при сохранении высокой точности измерений.

В цифровых автоколлиматорах для двухкоординатных измерений углов в настоящее время успешно используются матричные фотоприёмники, изготовленные на базе технологии приборов с зарядовой связью (ПЗС) — ПЗС-матрицы и ПЗС-линейки (однострочные ПЗС-матрицы) [1–6]. Преимуществом использования ПЗС-матрицы является большой объём получаемой от неё информации, обработка которого позволяет минимизировать влияние шумов и неоднородности чувствительности пикселей и, тем самым, повысить точность и чувствительность автоколлиматора. Однако для осуществления точных измерений угла, в том числе двухкоординатных, использование

ПЗС-линеек по сравнению с использованием ПЗС-матриц имеет свои преимущества. ПЗС-линейки обладают более высоким быстродействием, надёжностью, меньшими мощностью тепловыделения и тепловыми искажениями геометрии ПЗС в процессе измерений, меньшим временем готовности к измерениям, позволяют реализовать более простой алгоритм обработки информации. Преимущества ПЗС-линеек делают их в настоящее время незаменимыми в автоколлиматорах, требующих повышенной надёжности и высокой скорости измерений. В то же время для двухкоординатных измерений в автоколлиматорах, как правило, используются не менее двух ПЗС-линеек [6], что увеличивает габариты и усложняет конструкцию прибора.

В данной работе представлено описание малогабаритного двухкоординатного фотоэлектрического цифрового автоколлиматора (МДЦА), выполненного с использованием одной ПЗС-линейки и автоколлимационной марки специального вида [7]. Приведена оценка погрешности автоколлиматора вследствие неоднородности чувствительности пикселей. Основные технические характеристики МДЦА: габаритные размеры — $\varnothing 83 \times 155$ мм,

диаметр входного зрачка объектива — 43 мм, фокусное расстояние объектива — 142 мм, дискретность выходных данных — 0,01", диапазон измерения углов в вертикальной и горизонтальной плоскости — $\pm 10'$, предельная погрешность измерения угла в горизонтальной плоскости — не более $\pm 0,7''$, а в диапазоне измерения углов $\pm 7,5'$ — не более $\pm 0,5''$, предельная погрешность измерения угла в вертикальной плоскости — не более $\pm 5''$, частота выдачи цифровых данных измерения углов — 30 Гц. В электронной схеме прибора использованы только отечественные электронные компоненты.

Оптическая схема МДЦА представлена на рис. 1. Излучение светодиода 1 ($\lambda = 0,87$ мкм) проходит через линзы конденсора 2, автоколлимационную марку 3, призму 4, светоделительное покрытие 5, призму 6, объектив 7 и попадает на плоское зеркало 8. При этом отражённое от покрытия 5 излучение поглощается фильтром 10. Отражённое от зеркала 8 излучение проходит элементы схемы 7 и 6, частично отражается от покрытия 5, проходит призму 6, ослабляющий оптический фильтр 9 и попадает на ПЗС-линейку 11, фоточувствительный регистр которой расположен в горизонтальной плоскости перпендикулярно оптической оси объектива 7. Марка и фоточувствительная поверхность ПЗС-линейки расположены в фокальной плоскости объектива 7. Фильтр 9 используется для подавления блика второго порядка, возникающего в результате частичного отражения излучения от фоточувствительной поверхности ПЗС-линейки. Для уменьшения габаритных размеров МДЦА в качестве 7 использован телеобъектив.

Для реализации двухкоординатных угловых измерений при использовании только одной ПЗС-линейки в автоколлиматоре введена марка специального вида из трёх прозрачных штрихов на непрозрачном фоне, изображение которой, создаваемое объективом 7 в плоскости регистра R фоточувствительных элементов ПЗС-линейки, представ-

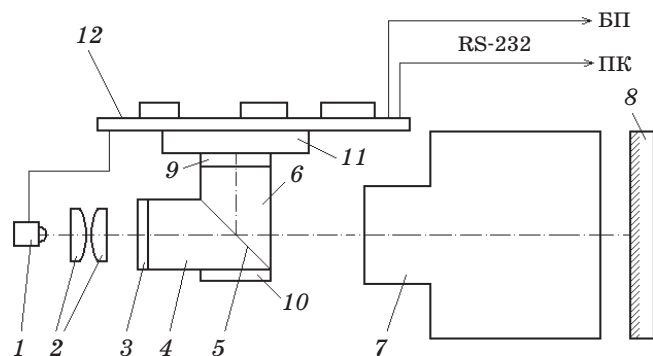


Рис. 1. Оптическая схема МДЦА. 1 — светодиод, 2 — линзы конденсора, 3 — автоколлимационная марка, 4 и 6 — призмы, 5 — светоделительное покрытие, 7 — объектив, 8 — плоское зеркало, 9 и 10 — оптические фильтры, 11 — ПЗС-линейка, 12 — печатная плата блока электроники с электронными компонентами.

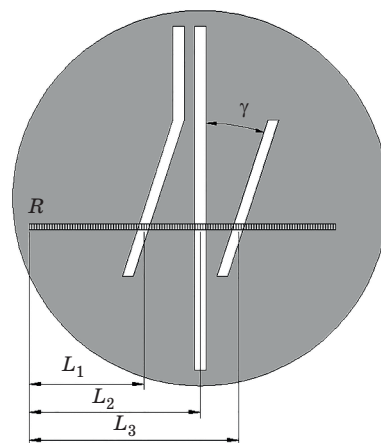


Рис. 2. Изображение автоколлимационной марки, создаваемое объективом в плоскости регистра R ПЗС-линейки.

лено на рис. 2. Центр вертикального штриха марки 3 и центр регистра R расположены на оптической оси объектива 7, а наклонные штрихи симметричны относительно центра вертикального штриха. При этом угол α между нормалью к поверхности зеркала и визирной осью МДЦА в горизонтальной плоскости определяется по формуле

$$\alpha = \arctg\left(\frac{2L_2 - L}{4F}\right), \quad (1)$$

где L_2 — расстояние от начала регистра R до центра распределения освещённости изображения вертикального штриха марки на регистре R , L — длина регистра R , F — фокусное расстояние объектива. Угол β между нормалью к поверхности зеркала и визирной осью МДЦА в вертикальной плоскости определяется по формуле

$$\beta = \arctg\left(\frac{2L_2 - L_1 - L_3}{4F \operatorname{tg} \gamma}\right), \quad (2)$$

где L_1 и L_3 — расстояния от начала регистра R до центров распределений освещённости изображений параллельных наклонных штрихов марки на регистре R , γ — угол между вертикальным и наклонным штрихом марки. Для уменьшения погрешности измерения углов α или β количество вертикальных или горизонтальных штрихов марки может быть увеличено. При этом случайная погрешность измерения угла α уменьшается в \sqrt{n} раз, где n — количество вертикальных штрихов.

Угол α является для МДЦА основным измеряемым углом, а угол β — вспомогательным и измеряется, как правило, с меньшей точностью. Данные измерений угла β могут быть использованы для контроля наклона зеркала в вертикальной плоскости с целью уменьшения виньетирования и,

соответственно, увеличения точности измерения угла α .

В автоколлиматоре использована одна из двух ПЗС-линеек микросхемы ФППЗ 30Л (АО «ЦНИИ «Электрон») с количеством пикселей 1024, высотой пикселя 150 мкм и шириной пикселя 13 мкм (шаг расположения пикселей). Электронная схема МДЦА состоит из блока электроники (БЭ) и блока питания (БП). С целью снижения габаритов и длины соединительных проводников схема БЭ, включающая ПЗС-линейку, собрана на одной печатной плате с размерами $44 \times 38 \text{ мм}^2$. БЭ содержит схему управления ПЗС-линейкой на основе базового матричного кристалла, микроконтроллер со встроенными аналого-цифровым преобразователем (АЦП), цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) и универсальным асинхронным приёмопередатчиком, схему управления током светодиода, приёмопередатчик стандарта RS-232. Программа микроконтроллера осуществляет обработку преобразованного АЦП сигнала ПЗС-линейки, определяет положение центров распределения освещённости изображений штрихов марки и на основе формул (1, 2) вычисляет углы поворота зеркала в горизонтальной и вертикальной плоскости. Программа также управляет электронным затвором ПЗС-линейки и, через посредство ЦАП, током светодиода для получения амплитуды сигнала ПЗС-линейки в заданном диапазоне. Усреднённые по четырём циклам опроса ПЗС-линейки данные измерений углов передаются в персональный компьютер (ПК) или управляющую микроЭВМ по интерфейсу RS-232 с частотой 30 Гц, что делает возможным проведение динамических измерений. Если регистр R пересекает изображения одного или двух штрихов марки, МДЦА передает в ПК коды, которые могут быть использованы для управления положением зеркала или автоколлиматора. При разработке электронной схемы и программы микроконтроллера использовалось свободное программное обеспечение. Типичный оцифрованный АЦП сигнал ПЗС-линейки в виде зависимости цифрового сигнала m на выходе АЦП от номера пикселя N представлен на рис. 3.

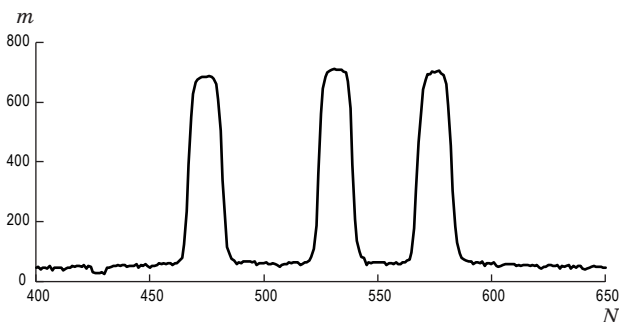


Рис. 3. График типичной зависимости $m(N)$.

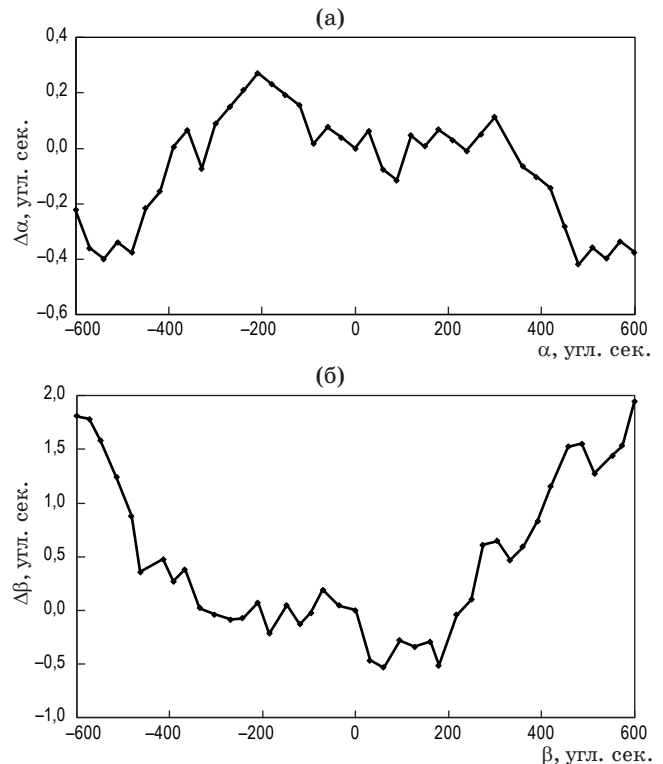


Рис. 4. Зависимости $\Delta\alpha$ от угла α при $\beta = 0$ (а) и $\Delta\beta$ от угла β при $\alpha = 0$ (б).

Макет МДЦА был подвергнут испытаниям с использованием в качестве эталона двухкоординатного цифрового автоколлиматора ОПТРО-АК-011 (ООО «ОПТРОТЕХ») с предельной погрешностью измерения углов $0,1''$ в диапазоне $\pm 15'$. При этом показания МДЦА усреднялись за время 0,5 с. На рис. 4а представлена экспериментальная зависимость систематической погрешности $\Delta\alpha$ измерения угла α прибором МДЦА при изменении α в диапазоне $\pm 10'$ и $\beta = 0$, а на рис. 4б — зависимость систематической погрешности $\Delta\beta$ измерения угла β при изменении β в диапазоне $\pm 10'$ и $\alpha = 0$.

С учётом данных измерений $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ при изменении углов α и β в диапазоне $\pm 10'$ и погрешности эталонного автоколлиматора величина $\Delta\alpha$ не превышает $\pm 0,7''$, а $\Delta\beta$ не превышает $\pm 5''$. Величина $\Delta\alpha$ при изменении углов α и β в диапазоне $\pm 7,5'$ не превышает $\pm 0,5''$.

Оценим погрешность определения угла α при малых α и β , т.е. когда аберрации объектива минимальны, и в отсутствие виньетирования. Пусть изображение вертикального штриха марки имеет вид практически прямоугольного распределения интенсивности $I(x)$ с амплитудой I_0 , где x — расстояние от начала ПЗС-линейки в пикселях, и захватывает пиксели с номерами от N_1 до N_2 (см. рис. 5). Тогда $L_2 = (N_1 - x_1 + N_2 - 1 + x_2)d_p/2$, где d_p — шаг пикселей, x_1 и x_2 — доли засвеченных участков пикселей N_1 и N_2 ($0 < x_1, x_2 \leq 1$).

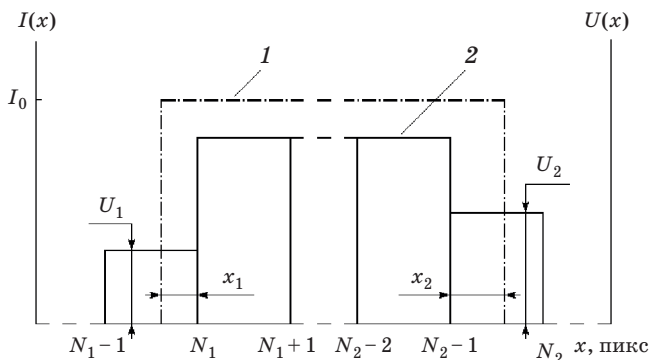


Рис. 5. Графики зависимостей $I(x)$ и $U(x)$. 1 — $I(x)$, 2 — $U(x)$.

Пусть $U(x)$ — зависимость от x снимаемого с ПЗС-линейки сигнала напряжения. Для сигнала U_1 от пиксела N_1 можно записать $U_1 = m_1 d_{\text{adc}} = k I_0 A_1 x_1$, где m_1 — цифровой сигнал на выходе АЦП от пиксела N_1 , d_{adc} — шаг квантования АЦП, k — коэффициент пропорциональности, A_1 — световая чувствительность пиксела N_1 . Отсюда получаем $x_1 = m_1 d_{\text{adc}} / (k I_0 A_1)$. Величину A_1 будем считать псевдослучайной функцией номера пиксела N_1 , предельное отклонение которой ΔA от среднего значения A_0 по данным производителя используемой ПЗС-линейки не превышает $\pm 3\%$. Тогда для погрешности определения x_1 при произвольном положении изображения штриха в пределах регистра можно записать

$$\Delta x_1 \approx \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A_0}\right)^2}, \quad (3)$$

где Δm — погрешность АЦП в единицах младшего разряда, M — цифровой сигнал АЦП, со-

ответствующий максимальному сигналу с ПЗС-линейки. Т.к. для МДЦА $\Delta m \leq 10$, $M \approx 700$, $\Delta A/A_0 \approx \pm 0,03$, из (3) получим $\Delta x_1 \approx \pm 0,033$ пиксела. Для погрешности угла α получим

$$\Delta \alpha \approx \frac{\Delta L_2}{2F} \approx \pm \frac{d_p}{2F} \sqrt{\left(\frac{\Delta x_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{2}\right)^2}, \quad (4)$$

Учитывая, что $\Delta x_2 \approx \Delta x_1$, $d_p = 13$ мкм, $F = 142$ мм, из (4) получим $\Delta \alpha \approx \pm 0,22''$. Данная оценка погрешности $\Delta \alpha$ вследствие погрешности АЦП и неоднородности чувствительности пикселей сопоставима с экспериментально полученной погрешностью МДЦА $|\Delta \alpha| \leq \pm 0,5''$ в диапазоне углов $\pm 7,5'$.

Таким образом, в работе описан малогабаритный двухкоординатный фотоэлектрический цифровой автоколлиматор, выполненный с использованием одной ПЗС-линейки и марки специального вида, и дана оценка его погрешности вследствие неоднородности чувствительности пикселей. Автоколлиматор позволяет измерять углы в горизонтальной и вертикальной плоскостях в диапазоне $\pm 10'$. Предельная погрешность измерения угла в горизонтальной плоскости не превышает $\pm 0,7''$, а в диапазоне измерения углов $\pm 7,5'$ — не превышает $\pm 0,5''$. Предельная погрешность измерения угла в вертикальной плоскости не превышает $\pm 5''$. Прибор может быть использован как самостоятельно, так и в составе сложных систем автоматического регулирования. Применение в автоколлиматоре только отечественных комплектующих элементов позволяет использовать его в устройствах и системах, от которых требуется повышенная надёжность и длительный срок эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А.Н., Гарцуев А.И., Полищук Г.С. и др. Цифровой автоколлиматор // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 42–47.
2. Королев А.Н., Гарцуев А.И. Цифровой двухкоординатный автоколлиматор с разрешением 0,001 угловых секунды // Измерительная техника. 2004. № 12. С. 29–32.
3. Каталог компании “TRIOPTICS” (Германия).
4. Каталог компании “MÖLLER-WEDEL OPTICAL” (Германия).
5. Ловчий И.Л., Жуков Ю.П., Петров Л.П. и др. Высокоточное устройство для измерения угла скручивания // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 9. С. 69–72.
6. Манин А.П., Попов С.О., Трубицин А.С. и др. Цифровой двухкоординатный динамический автоколлиматор // Патент России № 2437058. 2008.
7. Ловчий И.Л., Жуков Ю.П., Петров Л.П. и др. Двухкоординатный фотоэлектрический цифровой автоколлиматор // Патент России № 2535526. 2013.