

УДК 681.786, 004.94, 53.088

Моделирование широкодиапазонного однокоординатного автоколлиматора с протяженной маркой и приемником в виде линейки фоточувствительных элементов

© 2021 г. **И. Л. Ловчий, канд. физ.-мат. наук**

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

E-mail: lovchy@nioer.ru

Поступила в редакцию 01.09.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-11-56-65

Представлены результаты моделирования параметров малогабаритного автоколлиматора с однокоординатным приемником в виде линейки фоточувствительных элементов. Моделирование проводилось методом последовательной трассировки лучей через элементы оптической схемы автоколлиматора между сопряженными плоскостями марки и приемника с промежуточным отражением от плоского зеркала. Описанные оригинальные форма марки и алгоритм обработки моделируемых измерительных сигналов позволяют реализовать широкодиапазонный режим работы прибора с высокой точностью угловых измерений в центре диапазона.

Ключевые слова: автоколлиматор, трассировка лучей, метод Монте-Карло, погрешность измерений, линейка ПЗС, заполняемость пикселей.

Коды OCIS: 120.0120, 120.1680, 080.0080, 080.2720, 000.5490

ВВЕДЕНИЕ

Автоколлимационные измерительные системы имеют широкое применение в науке и технике [1]. В качестве приемников излучения, как правило, используются многоэлементные матричные или линейные фоточувствительные приборы, позволяющие в совокупности с современной цифровой схемотехникой выполнять высокоточные скоростные угловые измерения [2].

Основные параметры автоколлиматора (АК) — диапазон и точность угловых измерений, взаимосвязаны и зависят от фокусного расстояния объектива, его аберраций, диаметра входного зрачка, размеров фоточувствительных элементов (пикселей) приемника, дистанции до зеркала. Обычно чем шире диапазон, тем больше допустимая погрешность

измерений [3]. Однако для решения некоторых практических задач требуется универсальный широкодиапазонный АК с повышенной точностью измерений в центральной части диапазона. Такой АК, в частности, может быть востребован в системах привязки разнесенных платформ для параллельной реализации широкопольного режима поиска и узкопольного режима точного позиционирования.

Использование в АК короткофокусного объектива позволяет расширить диапазон угловых измерений, но одновременно увеличивается погрешность измерений вследствие относительно малого коэффициента преобразования углового смещения в линейное. При однокоординатных угловых измерениях частичное нивелирование увеличения погрешности может быть осуществлено путем

использования марки в виде целевого раstra из N прозрачных штрихов, поскольку в этом случае точность позиционирования центра тяжести изображения марки в центральной части приемника возрастает в \sqrt{N} раз. Однако aberrации наклонных пучков объектива АК приводят к искажениям изображений штрихов и росту ошибок на краях диапазона измерений.

Использование в АК длиннофокусного объектива увеличивает точность позиционирования изображения марки, но при большом коэффициенте преобразования углового смещения в линейное диапазон измерений ограничивается размером приемника. При однокоординатных угловых измерениях возможно использование в качестве контрольного элемента (КЭ) высокоточного многогранного зеркала с последовательным переходом при развороте отражателя от одной актуальной рабочей грани к другой [4]. Для «окраски» граней зеркала может быть использовано дискретное изменение углов между соседними гранями. Тогда при выполнении условия одновременного позиционирования на приемнике не менее двух изображений марки отклик АК становится однозначным. Однако изготовление такого зеркала технологически сложное и трудоемкое.

В публикации [5] рассмотрен метод увеличения диапазона измерения и рабочей дис-

танции посредством изменения общей схемы АК, в результате которого для измерений используется не параллельный, а расходящийся пучок.

В настоящей работе проведен анализ иного способа расширения диапазона измерений однокоординатного АК с одновременным сохранением точности измерений в центре диапазона. В основе способа лежит использование протяженной несимметричной марки из раstra прозрачных вертикальных штрихов. В работе представлены результаты моделирования АК с указанной маркой, включая исследование оригинального алгоритма обработки моделируемых измерительных сигналов. Показано, что его применением обеспечивается повышенная точность измерений в расширенном угловом диапазоне.

1. ПРЕДПОСЫЛКИ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В АВТОКОЛЛИМАТОРЕ ПРОТЯЖЕННОЙ МАРКИ

Предположим, что марка состоит из раstra прозрачных вертикальных штрихов. На рис. 1 представлена условная схема АК с совмещенной плоскостью марки и приемника.

При малом расстоянии до нормально расположенного зеркала изображения отдельных штрихов марки строятся на приемнике

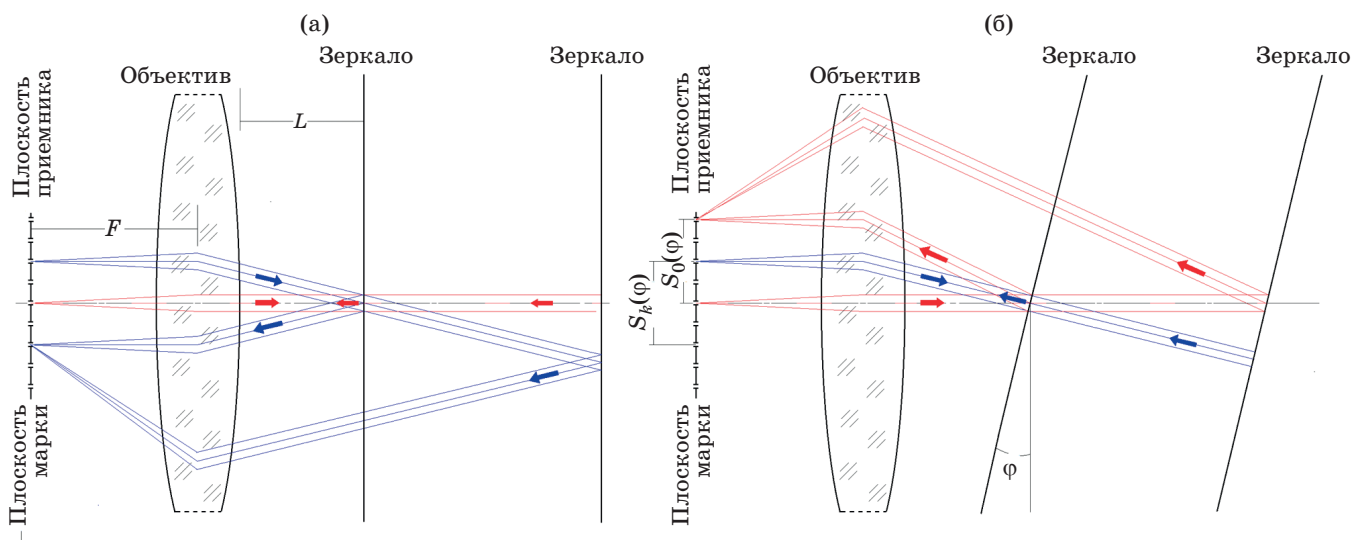


Рис. 1. Условные схемы АК и траектории лучей при отражении от зеркал. Прозрачные штрихи марки изображены в виде точечных диафрагм (вид на марку сверху). Размер приемника примерно равен расстоянию между крайними штрихами марки. Траектории лучей соответствуют отражению от зеркала, перпендикулярного оси объектива, (а) и от развернутого на угол φ зеркала (б).

практически без искажений, поскольку лучи проходят вблизи центра объектива и под небольшими углами относительно его оси. По сути, траектории лучей от штрихов марки в этом случае заполняют диапазон траекторий от центрального штриха при работе АК в оптимальном режиме измерения угла разворота зеркала. При увеличении L лучи от периферийных штрихов после отражения сдвигаются к краю объектива и углы «изломов» траекторий при его прохождении растут. Аберрации наклонных пучков приводят к заметным искажениям изображений штрихов марки, причем в общем случае чем дальше от оси расположен штрих, тем сильнее искажения его изображения. Искажения изображения центрального штриха остаются минимальными и практически не зависящими от расстояния. Таким образом, фиксацию нулевого угла разворота зеркала целесообразно проводить по анализу изображения центрального штриха.

Ситуация меняется при развороте зеркала. Допустим, зеркало развернуто относительно оси объектива на угол φ (рис. 1б). Положение энергетического центра тяжести изображения центрального штриха смещается в плоскости приемника на расстояние $S_0(\varphi)$. При увеличении L отраженные от зеркала лучи центрального штриха сдвигаются к краю объектива, аберрации наклонных пучков растут и искажают проекцию штриха в плоскости приемника. Это приводит к изменению значения $S_0(\varphi)$ и росту погрешности измерения угла φ . Предположим, что при данном угле φ лучи от k -го штриха марки падают на зеркало нормально, т.е. отраженные лучи накладываются на исходные. Тогда траектории прохождения лучей через объектив слабо зависят от расстояния до зеркала и смещение проекции штриха $S_k(\varphi)$ (относительно его условного начального изображения в идеальной безабберационной оптической системе) остается почти неизменным. Таким образом, данный конкретный угол φ с точки зрения погрешности его автоколлимационного измерения выгоднее определять по анализу изображения k -го штриха в плоскости приемника, т.е. по смещению $S_k(\varphi)$. При произвольном угле разворота зеркала измерения выгоднее проводить по анализу изображения того из штрихов, угол падения лучей от ко-

торого на зеркало относительно его нормали минимален. Адекватные результаты измерения в полном диапазоне разворота зеркала будут иметь место при адаптивном выделении из всех проекций штрихов нужного для анализа изображения. Очевидно, что в этом случае штрихи в марке должны быть «окрашенными».

Таким образом, алгоритм угловых измерений АК с описываемой маркой может быть представлен следующими этапами:

- идентификация изображений штрихов на линейке фоточувствительных элементов,
- позиционирование энергетических центров тяжести изображений штрихов,
- определение смещений энергетических центров тяжести изображений штрихов относительно исходных положений центров штрихов в марке,
- использование найденных смещений для получения массива измерений угла поворота зеркала,
- усреднение результатов измерений для определения предварительного значения измеряемого угла,
- выделение штриха в марке, сдвиг которого относительно центра марки наиболее близок к произведению фокусного расстояния объектива на тангенс определенного выше угла,
- использование результата измерения угла по изображению выделенного штриха в качестве отклика (результата измерения угла) АК.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве объекта исследования был выбран малогабаритный фотоэлектрический цифровой АК [6] со следующими основными техническими характеристиками: фокусное расстояние и диаметр входного зрачка объектива — 142 и 43 мм, диапазон выдачи угловой информации при расстоянии до КЭ не более 2000 мм — $\pm 20'$, габаритные посадочные размеры оптоэлектронного блока $\varnothing 83 \times 155$ мм. Приемник — линейка ПЗС с количеством пикселей 1024, ширина/высота пикселя — 13/150 мкм. Экспериментально измеренная предельная погрешность измерения угла в горизонтальной плоскости в диапазоне $\pm 10'$ не превышала $\pm 0,7''$. В описанном АК использовалась марка специального вида для обеспече-

ния двухкоординатных угловых измерений. Для измерения угла в горизонтальной плоскости использовался центральный штрих марки шириной 140 мкм. На рис. 2 представлена оптическая схема анализируемого АК с переменным блоком разведения лучей и семилинзовым телеобъективом.

Настоящее исследование ограничено случаем однокоординатного разворота КЭ в горизонтальной плоскости и соответственно однокоординатным измерением угла. Это подразумевает вертикальное положение зеркала (ниже при обсуждении результатов приведены допустимые отклонения от вертикали) либо использование в качестве КЭ составного набора протяженных двугранных 90° -ых уголкового отражателей, ребра которых расположены параллельно горизонту.

Моделирование проводилось методом Монте-Карло на основе последовательной трассировки случайных лучей через все элементы оптической схемы АК, начиная от плоскости марки и кончая поверхностью фоточувствительных элементов приемника. Заполняемости пикселей лучами в конце трассировки отражали уровни их «освещенности» в тех или иных условиях виртуального эксперимента и симулировали форму видеосигналов на выходе приемника, обработка которых по определенному алгоритму моделировала реакцию АК в целом. Число анализируемых лучей, прошедших марку, в зависимости от решаемой задачи составляло от десятков тысяч до нескольких миллионов. Каждый луч характеризовался шестью параметрами — координатами начальной точки и направляющими косинусами лучевого вектора. Углы преломления (отражения) луча на (от) поверхности оптического элемента находились в приближении геометрической оптики в плоскости, определяемой лучевым вектором и вектором

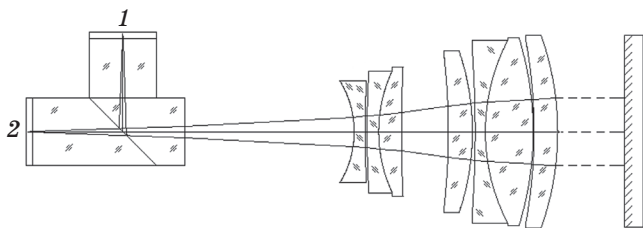


Рис. 2. Оптическая схема автоколлиматора. 1 — плоскость линейки ПЗС, 2 — плоскость марки.

нормали к поверхности в точке пересечения. Для этого в программной среде LabVIEW были разработаны виртуальные приборы — программы преобразования параметров луча при пересечении плоской или сферической поверхности. Исходный массив лучевых параметров от марки циклически преобразовывался при пересечении поверхностей элементов схемы. Лучи, выходящие за апертуры элементов, «окрашивались» и отсеивались в конце каждого цикла. Размер зеркала при моделировании не ограничивался.

В отличие от общепринятого, центрально симметричного расположения марки, размер которой обычно существенно меньше размера приемника, при моделировании в качестве марки рассматривался растр из 13-ти вертикально расположенных прозрачных штрихов, ширина которых менялась дискретно от 100 до 220 мкм через 10 мкм, с расстоянием между центрами 1 мм. Дистанция от торца объектива до КЭ варьировалась в диапазоне от 50 до 1000 мм. Засветка марки АК и чувствительность пикселей линейки ПЗС предполагались равномерными.

3. ПАРАМЕТРЫ ЗАСВЕТКИ МАРКИ И ЗАПОЛНЯЕМОСТЬ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИЕМНИКА

Первоначально при моделировании использовалась равномерная эквидистантная по сечению и по угловым направлениям засветка марки, однако это приводило к возникновению муарового эффекта в ее изображении в плоскости приемника, поэтому в дальнейшем использовалась равномерно распределенная случайная засветка как по сечению, так и по направлениям лучей в телесном угле $0,006$ ср (в стекле), который приблизительно соответствовал угловому распределению засветки марки реального АК.

Случайный характер засветки марки при небольшом количестве анализируемых лучей может привести к вероятностной неопределенности положения энергетических центров тяжести изображений штрихов марки, поэтому предварительно определялся минимальный уровень заполняемости пикселей лучами, позволяющий пренебречь указанной неопределенностью при моделировании.

Допустим, что систематическая погрешность Δ АК на центральном участке ($\pm 10'$) общего углового диапазона не должна превышать $\pm 1''$. Известно, что случайной погрешностью измерения (в нашем случае — имитационного измерения) можно пренебречь при отношении ее среднеквадратического отклонения (СКО) σ к систематической ошибке $\Delta < 1/8$ [7]. В соответствии с этим ограничим СКО случайной составляющей погрешности определения центра тяжести изображения штриха при моделировании значением $\pm 0,125''$. Среднеквадратическое отклонение центра тяжести изображения штриха $\sigma(x_{\text{ave}})$ (среднего значения координат лучей вдоль фоточувствительной линейки) связано с СКО общей совокупности координат лучей $\sigma(x_i)$ следующим выражением:

$$\sigma(x_{\text{ave}}) = \frac{\sigma(x_i)}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где n — количество лучей, формирующих изображение штриха на приемнике при моделировании. При случайном равномерном заполнении промежутка шириной a СКО равно

$$\sigma(x_i) = \frac{a}{2\sqrt{3}}. \quad (2)$$

Минимальная ширина изображения штриха марки в нашем случае примерно соответствует угловому размеру восьми пикселей ($a \cong 76''$), т.е. $\sigma(x_i) \cong 22''$. Тогда из выражения (1) находим $n \approx 31000$, что соответствует заполняемости отдельного пиксела порядка 4000. Заметим, что случай заполнения промежутка a с точным определением координат точек вдоль него отличается от случая заполнения этого же промежутка с дискретным распределением координат (с разбиением на участки по $9,44''$ — угловой размер одного пиксела), однако при больших значениях n результаты расчета в целом идентичны. В подтверждение этого на рис. 3 представлены результаты моделирования отклонения энергетического центра тяжести изображения штриха (в угловых секундах) относительно центрального положения в зависимости от числа случайных реализаций. Моделирование проводилось при приведенной выше дискретизации координат вдоль промежутка. Положение центра

тяжести изображения находилось из выражения

$$x_{\text{ave}} = \frac{\sum_1^8 n_i x_i}{\sum_1^8 x_i}, \quad (3)$$

где n_i — заполняемость i -го отрезка, x_i — координата центра i -го отрезка относительно центра промежутка a . Рисунок 3а демонстрирует общий характер уменьшения отклонения с ростом числа случайных реализаций. Для увеличения масштаба изображения разброс положений центра тяжести на рисунке показан в диапазоне $\pm 2''$. График на рис. 3б соответствует участку в 1000 реализаций при n от 30500 до 31500. Распределение отклонений на рис. 3б показывает, что за пределы $\pm 0,375''$ выходят лишь четыре точки (выделены кружками). Таким образом, при $n = 31000$ с вероятностью 99,6% предельная случайная ошибка составляет $\pm 0,375''$, что по правилу «трех сигма» хорошо согласуется с введенным нами выше ограничением по СКО случайной ошибки при моделировании.

Наиболее широкий штрих марки соответствует угловому размеру семнадцати пиксе-

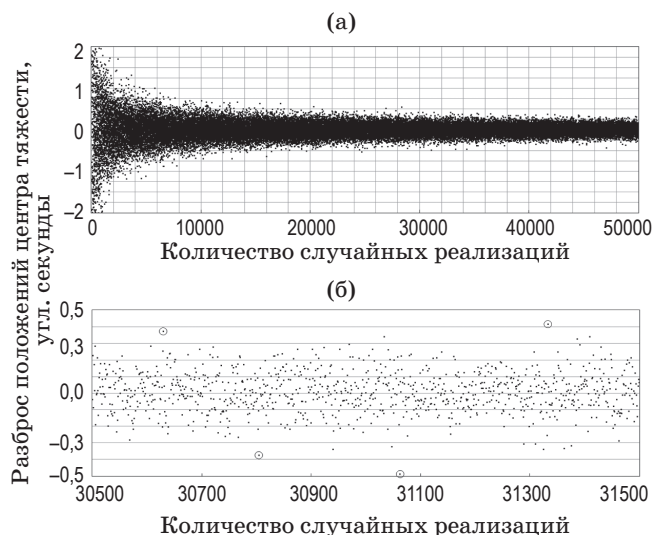


Рис. 3. Отклонения центра тяжести изображения штриха относительно центрального положения в зависимости от числа случайных реализаций. Общий характер уменьшения отклонения с ростом числа случайных реализаций (а), график, соответствующий участку в 1000 реализаций, при количестве лучей, формирующих изображение штриха на приемнике при моделировании, от 30500 до 31500 (б).

лов соответственно $\sigma(x_i) \cong 47''$. Тогда исходя из формулы (1) необходимое количество лучей — $n \approx 140000$, а заполняемость отдельного пиксела — около 8000. Ограничимся при моделировании средней заполняемостью пикселов лучами 6000 шт./пиксел. При такой минимальной заполняемости пиксела в целом можно уже пренебречь вероятностной неопределенностью положения энергетического центра тяжести изображения отдельного штриха марки. Заметим, в реальной линейке ПЗС в линейном режиме ее работы количество фотоэлектронов в пикселе может быть в десятки раз выше указанного значения, однако реализация такой наполняемости при моделировании неоправдана вследствие как незначительности дальнейшего уточнения результатов, так и непропорционального роста компьютерного времени вычислений.

4. ОСОБЕННОСТИ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

При моделировании высота штрихов марки предполагалась равной 12 мм. С учетом того, что высота пикселов линейки ПЗС составляет лишь 150 мкм, для уменьшения числа ненужных траекторных вычислений марка засвечивалась фрагментарно, в зависимости от условий проводимого виртуального эксперимента. Для этого предварительно, при сравнительно небольшом количестве трассируемых лучей, в плоскости приемника формировалось изображение засвеченного участка марки для оценки степени его наложения на пикселы линейки. Например, при моделировании отклика АК на разворот наклоненного на $5'$ зеркала засвеченная полоска марки ограничивалась по высоте от 0,33 до 0,51 мм. После определения необходимого участка засветки запускалась программа циклического накопления массива лучей, прошедших от марки до выходной поверхности объектива АК. Для обеспечения необходимой заполняемости пикселов линейки (6000 шт./пиксел) на выходе объектива формировался массив приблизительно из $(1-1,5) \times 10^6$ лучей, которые далее отражались от расположенного на расстоянии L зеркала и проходили через оптическую схему в обратном направлении до линейки ПЗС,

заполняя ее пикселы и формируя, таким образом, отклик АК при конкретном расположении зеркала. Эти же лучи использовались в дальнейшем при последовательном сканировании зеркалом всего измеряемого углового диапазона. При другом положении зеркала по вертикали на выходе объектива накапливался новый массив лучей, соответствующий этому положению. Массивы заполняемости пикселов при том или ином положении КЭ запоминались и использовались в дальнейшем в процессе отладки алгоритмов обработки «измерительных» сигналов.

Полное время вычислений отклика АК на компьютере (процессор Intel(R) Core(TM) i5-7400 CPU 3.00 GHz, оперативная память 8 ГБ, 64-разрядная операционная система) при развороте зеркала в диапазоне от $-150'$ до $+150'$ через $1'$ составляло от 4,5 (при $L = 1000$ мм) до 13 часов (при $L = 50$ мм).

При увеличении дистанции до зеркала изображение марки в плоскости приемника заметно искажается в части изменения соотношений ширины проекций штрихов и расстояний между ними. Тем не менее шаг различия штрихов в 10 мкм позволял надежно идентифицировать их изображения на линейке ПЗС, при этом учитывались ширина проекций штрихов, дистанции между соседними проекциями, монотонность последовательности ширины проекций (дистанций) по возрастанию (убыванию). Для отбрасывания сильно виньетированных изображений дополнительно накладывались условия допустимого разброса амплитуд видеоимпульсов на выходе линейки ПЗС, а также степени «прямоугольности» этих импульсов. Ширина отдельного видеоимпульса находилась из разности положений его фронтов. Положение P переднего фронта определялось из выражения

$$P = P_{\max} + \frac{A_{\text{flwg}} - A_{\text{prev}}}{A_{\text{prev}} + A_{\max} + A_{\text{flwg}}}, \quad (4)$$

где P_{\max} — положение на линейке ПЗС отрезка с максимальным скачком заполняемости соседних пикселов, A_{\max} — значение максимального скачка, A_{prev} — значение предыдущего скачка, A_{flwg} — значение последующего скачка. Положение заднего фронта определялось аналогичным образом.

5. УТОЧНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ МАРКИ И ПРИЕМНИКА ОТНОСИТЕЛЬНО ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ОБЪЕКТИВА АВТОКОЛЛИМАТОРА

Предварительно, до проведения основного виртуального эксперимента, по уровню совпадения откликов АК в диапазоне $\pm 10'$ на дистанциях до зеркала 50, 500 и 1000 мм уточнялось оптимальное (по сравнению с расчетным значением по оптическому выпуску) расстояние между призмным блоком с маркой и линейкой ПЗС и объективом. Так, на рис. 4 представлены результаты моделирования отклика АК с маркой в виде одиночного штриха при расчетном значении указанного расстояния. Результаты показывают, что при расчетном положении объектива отклики АК на разных дистанциях существенно различны, что свидетельствует о нарушении условия сопряженности плоскостей марки и приемника [8]. Небольшими последовательными изменениями положения объектива относительно призмного блока было определено оптимальное расстояние, отличающееся от расчетного примерно на 0,04 мм. По сути, такая виртуальная коррекция соответствует настоящей «подгонке» положения объектива при юстировке реального АК по критерию неизменности результатов измерения малых углов при разных расстояниях до КЭ. На рис. 5 представлены результаты моделирования после приведенной выше коррекции. В диапазоне $\pm 5'$ отклики АК на всех дистанциях практически совпадают, далее на дистанции 1000 мм реакция АК искажается. На дистанциях 50 и 500 мм отклики АК по всему диапазону $\pm 10'$

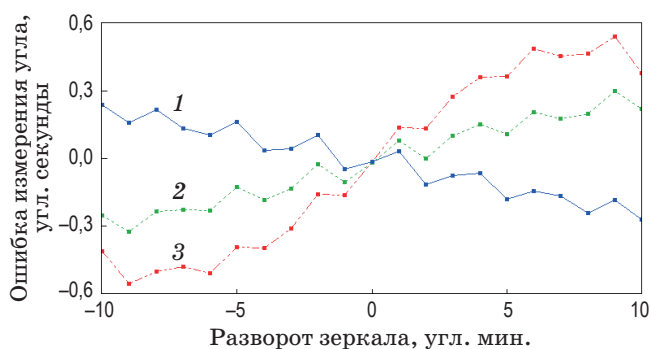


Рис. 4. Кривые ошибки угловых измерений на дистанциях до зеркала 50 (1), 500 (2) и 1000 (3) мм при расчетном положении объектива относительно призмного блока.

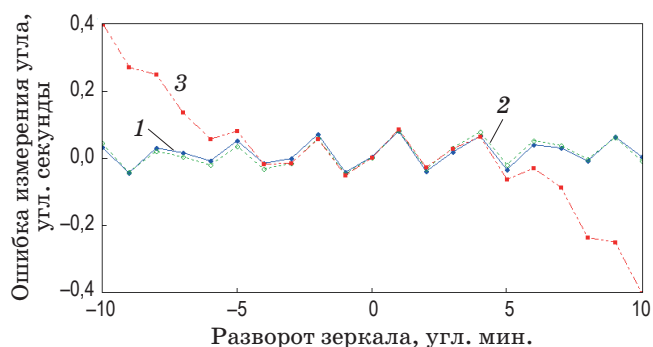


Рис. 5. Кривые ошибки угловых измерений на дистанциях до зеркала 50 (1), 500 (2) и 1000 (3) мм при скорректированном положении объектива относительно призмного блока.

одинаковы. Искажение кривой ошибки на дистанции 1000 мм не связано с виньетированием обратно отраженного светового пучка на апертуре объектива, а обусловлено остаточными аберрациями последнего. Заметим, что при небольшой корректировке масштабного коэффициента реакции АК (при умножении показаний АК на коэффициент 1,00027 — в данном конкретном случае) систематические ошибки всех трех кривых в диапазоне измерения $\pm 10'$ не будут превышать $\pm 0,25''$.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТКЛИКА АВТОКОЛЛИМАТОРА

На рис. 6а представлены результаты моделирования реакции АК с маркой из 13 прозрачных штрихов разной ширины для разных алгоритмов обработки измерительных сигналов при дистанции до зеркала 50 мм. Контрольный элемент (зеркало) расположен вертикально и разворачивается в горизонтальной плоскости. Точки на кривой 1 отражают результаты при обработке изображения только центрального штриха марки и соответствуют реакции типичного АК с маркой в виде одиночного штриха. Точки на кривой 2 соответствуют алгоритму определения угла с адаптивным выделением из всех проекций штрихов нужного для анализа изображения k -го штриха и соответственно нужного значения вычисленного угла φ_k . Для этого определялось среднее значение φ_{ave} от вычисленных углов для каждого из изображений штрихов, участвующих в обработке после выполнения условий равномерности амплитуд и «прямоугольности»

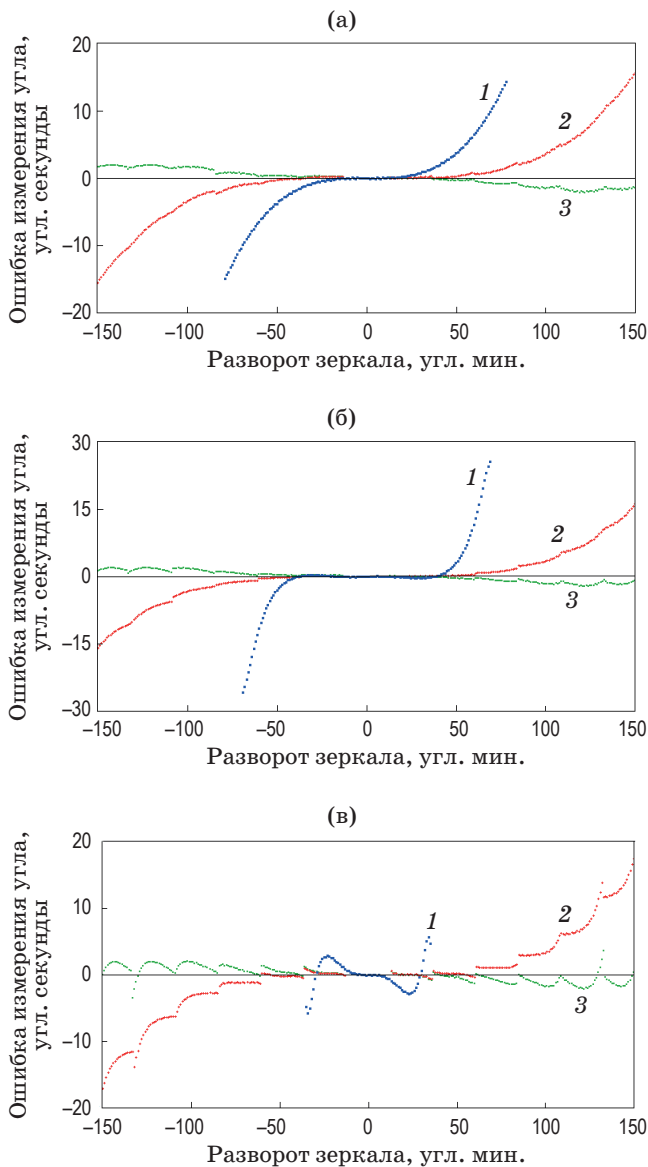


Рис. 6. Систематические ошибки при $L = 50$ (а), 500 (б) и 1000 (в) мм. 1 — результаты при обработке изображения только центрального штриха марки соответствуют реакции типичного АК с маркой в виде одиночного штриха, 2 — результаты определения угла с адаптивным выделением из всех проекций штрихов нужного для анализа изображения k -го штриха и нужного значения вычисленного угла φ_k (первый алгоритм), 3 — коррекция по второму алгоритму в части использования для вычисления угла φ_i модифицированного выражения (6).

видеоимпульсов. Углы φ_i для отдельных штрихов вычислялись по сдвигу центра тяжести изображения штриха относительно его первоначального положения в условной, безбаррационной, системе, т.е. от своего обратно-

симметричного положения относительно центра марки/линейки ПЗС

$$\varphi_i = \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{\text{ЦТ}_i}{F} + \arctan \frac{\delta_i}{F} \right), \quad (5)$$

где δ_i — сдвиг i -го штриха в марке относительно ее центра, ЦТ_i — положение центра тяжести изображения i -го штриха на линейке ПЗС относительно ее центра при развороте зеркала на угол φ относительно визирной оси АК, F — фокусное расстояние объектива. Оптимальный k -й штрих в марке определялся по значению сдвига δ_k штриха в марке относительно ее центра, ближайшего к произведению $F \tan \varphi_{\text{ave}}$.

Как видно из рис. 6а, в диапазоне выдачи угловой информации по изображению центрального штриха (кривая 1) использование алгоритма с адаптивным выделением оптимального для анализа изображения приводит в случае рассматриваемого объектива примерно к десятикратному снижению систематической ошибки измерений при одновременном почти двукратном расширении общего диапазона измерений (кривая 2). Для частичной коррекции ошибок по краям расширенного диапазона может быть использована дополнительная поправочная функция. В частности, для моделируемого объектива хороший результат дает замена в выражении (5) суммы арктангенсов от аргументов на арктангенс от суммы аргументов

$$\varphi_i = \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{\text{ЦТ}_i + \delta_i}{F} \right). \quad (6)$$

Кривая 3 на рис. 6а соответствуют коррекции второго алгоритма в части использования для вычисления угла φ_i модифицированного выражения (6).

Поскольку, как отмечалось выше, положение центра тяжести изображения оптимального k -го штриха слабо зависит от расстояния до КЭ, то выражение (6) может быть использовано для коррекции систематической ошибки и на других дистанциях. На рис. 6б, в представлены результаты моделирования на дистанциях до зеркала 500 и 1000 мм.

Очевидно, что для коррекции результатов угловых вычислений по центральному штриху на разных L невозможно подобрать общую

поправочную функцию как вследствие существенно разных диапазонов выдачи угловой информации, так и резкого различия форм кривых ошибки.

При увеличении дистанции до зеркала выигрыш в части кратности расширения диапазона измерений при использовании адаптивного алгоритма растет, поскольку вследствие виньетирования обратно отраженного пучка диапазон выдачи угловой информации по центральному штриху падает с ± 79 до $\pm 35'$. В реальном АК с маркой из одиночного штриха диапазоны выдачи информации немного шире, но в нашем моделировании вне указанных диапазонов виртуальная интенсивность видеоимпульса центрального штриха становится заметно ниже интенсивности других находящихся в поле зрения видеоимпульсов, и поэтому этот видеоимпульс игнорируется (выполнение условий по допустимому разбросу амплитуд и «прямоугольности» виртуальных видеоимпульсов на выходе линейки ПЗС при моделировании). Систематическая ошибка при обработке изображения центрального штриха составляет до $\pm 26''$, но в диапазоне $\pm 35'$ она на всех дистанциях не превышает $\pm 7''$, при этом в диапазоне $\pm 10'$ она менее $\pm 1''$, а в диапазоне $\pm 6'$ — менее $\pm 0,1''$. В диапазоне $\pm 150'$ систематическая ошибка измерений по скорректированному адаптивному алгоритму на всех дистанциях не превышает $\pm 4''$. В диапазоне $\pm 12'$ угловая информация определяется по изображению центрального штриха с соответствующими ошибками. Обратим внимание на визуально заметную разную степень «дребезга» кривых ошибок в начале (анализируется изображение первого, наиболее узкого штриха марки) и в конце углового диапазона (анализируется изображение последнего, наиболее широкого штриха марки), что, как отмечалось выше, связано с разными вероятностными ошибками определения энергетических центров тяжести изображений узкого и широкого штрихов при одинаковой заполняемости пикселей.

Наклон КЭ по вертикали на $\pm 5'$ относительно оси измеряемого горизонтального разворота практически не меняет вид кривых, но систематическая ошибка в диапазоне $\pm 6'$ возрастает до $\pm 0,2''$ за счет появления небольшого постоянного смещения кривой. При более сильных наклонах зеркала область центрального

линейного участка сужается вплоть до его исчезновения, систематические ошибки измерений растут. При $L = 1000$ мм и наклоне зеркала $30'$ систематические ошибки по второму модифицированному алгоритму составляют уже до $\pm 12''$. Поэтому для адекватного измерения угла разворота зеркала в горизонтальной плоскости разумно ограничить допустимое при однокоординатных измерениях отклонение зеркала от вертикали $\pm 5'$. Очевидно, что при использовании в качестве КЭ составного набора протяженных двугранных 90° -ых угольковых отражателей, ребра которых расположены параллельно горизонту, систематические ошибки АК будут соответствовать результатам, представленным на рис. 6.

Понятно, что результаты, полученные при моделировании АК с каким-либо конкретным объективом, не могут быть универсальными. В качестве примера на рис. 7 представлены результаты моделирования систематических ошибок АК с трехлинзовым телеобъективом из учебного пособия [9] (задача 19.2) в диапазоне угловых измерений $\pm 60'$. Фокусное расстояние объектива 320 мм, световой диаметр положительной склейки линз при моделировании принимался равным 42 мм, отрицательной линзы — 14 мм. В качестве марки использовался растр из 27 прозрачных штрихов шириной от 40 до 300 мкм с шагом дискретизации

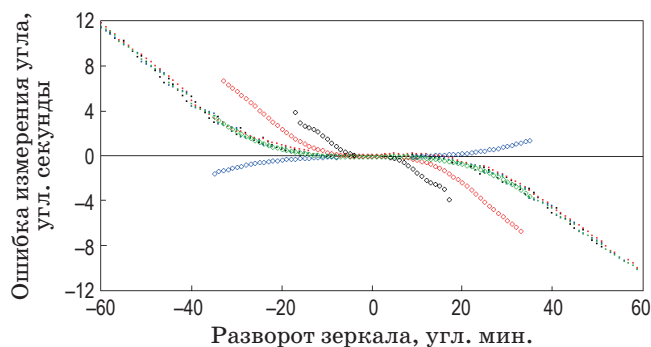


Рис. 7. Систематические ошибки при разных расстояниях до зеркала для АК с трехлинзовым телеобъективом из публикации [9]. Синие полые и сплошные точки отражают результаты моделирования систематической ошибки с вычислениями соответственно по центральному и по оптимальному (с использованием адаптивного алгоритма) штрихам марки при расстоянии L до вертикально расположенного зеркала 50 мм, зеленые точки — при $L = 500$ мм, красные — при $L = 1000$ мм, черные — при $L = 2000$ мм.

10 мкм и расстоянием между центрами штрихов 500 мкм. Как видно из рисунка, для данного объектива результаты вычисления угла по центральному штриху ближе к истине при минимальном расстоянии до зеркала, однако при его увеличении адаптивный алгоритм показывает более адекватные результаты. Поскольку типичный допустимый диапазон расстояний до КЭ при автоколлимационных измерениях превышает, по крайней мере, в несколько раз фокусное расстояние объектива, использование адаптивного алгоритма в целом и в этом случае оказывается предпочтительным. Обратим внимание на хорошее совпадение результатов угловых вычислений по адаптивному алгоритму для разных дистанций (отличия в пределах 1"), что подтверждает сделанный ранее вывод о возможности применения общей поправки для адаптивного алгоритма с целью нивелирования ошибки по краям расширенного диапазона. Вид поправки определяется геометрическими и абберационными параметрами объектива, т.е. для каждого объектива она индивидуальна. В данном случае корректирующая поправка отличается от предложенной выше для семилинзового телеобъектива ввиду обратной зависимости систематической ошибки от измеряемого угла.

Таким образом, использование распределенной марки из раstra прозрачных штрихов, ширина которых меняется известным

дискретным образом, позволяет существенно расширить диапазон адекватных угловых измерений АК с одновременным обеспечением высокой точности измерений в центральной части их диапазона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты моделирования точностных параметров однокоординатного автоколлиматора с семилинзовым телеобъективом, маркой из 13 прозрачных штрихов и приемником в виде линейки фоточувствительных элементов. Алгоритм обработки измерительных сигналов позволяет надежно идентифицировать изображения штрихов марки в плоскости фотоприемника и адаптивно выделять из всех изображений оптимальное для дальнейшего определения угла. Малый разброс результатов вычисления по адаптивному алгоритму при разных дистанциях до контрольного элемента (зеркала) позволяет подобрать общую поправочную функцию для коррекции систематических ошибок по краям углового диапазона. В диапазоне дистанций 50–1000 мм до зеркала с наклоном не более $\pm 5'$ расчетная систематическая ошибка автоколлиматора не превышает $\pm 4''$ в обзорном режиме работы (диапазон измерений $\pm 150'$), $\pm 1''$ в диапазоне $\pm 10'$ и $\pm 0,2''$ в диапазоне $\pm 6'$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аникст Д.А., Костантинович К.М., Меськин И.В., Панков Э.Д. Высокоточные угловые измерения / Под ред. Якушенкова Ю.Г. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
2. Zhenglan B., Min G., Zuoren D., Qing Y., Ronghui Q., Zujie F. Two-coordinate dynamic photoelectric autocollimator based on single linear CCD // Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications. Proc. SPIE. 2010. V. 7855. P. 78550H.
3. Electronic autocollimators. Measure with precision. [Электронный ресурс] // Möller-Wedel Optical GmbH [Официальный сайт]. URL: https://www.haag-streit.com/fileadmin/Moeller_wedel_optical/Brochures/Electronic_Autocollimators/ELCOMAT__English.pdf (дата обращения: 31.08.2021).
4. Бурмистренко В.А., Богданович Э.М., Ванюрихин А.И., Гайлиш Э.П. Устройство для контроля точности автоколлиматоров // А.с. № 560135. Опубликовано 30.05.77. Бюллетень № 20.
5. Коняхин И.А., Ворона А.М. Экспериментальные исследования широкодиапазонного автоколлиматора // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2005. Вып. 18. С. 224–227.
6. Жуков Ю.П., Ловчий И.Л., Пестов Ю.И., Сергеев В.А., Страдов Б.Г. Малогабаритный двухкоординатный цифровой автоколлиматор // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 8. С. 29–35.
7. Сулаберидзе В.Ш. Методы анализа и обработки измеренных значений величин: уч. пособ. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2013. 122 с.
8. Голубовский Ю.М., Пивоварова Л.Н. Погрешность измерения фотоэлектрического автоколлиматора при различных расстояниях до автоколлимационного зеркала // Оптический журнал. 1995. Т. 62. № 6. С. 87–90.
9. Авенко М.И., Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Задачник по прикладной оптике: уч. пособ. М.: Высш. школа, 2003. 591 с.