

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-01-49-65

УДК 681.786; 004.94; 53.088

Моделирование параметров двухкоординатного автоколлиматора с многоэлементной маркой и матричным фотоприемником

Игорь Леонидович Ловчий

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

lovchy@niioep.ru

<http://orcid/0000-0002-8743-5407>

Аннотация

Предмет исследования. Виртуальная модель двухкоординатного цифрового автоколлиматора с матричным фотоприемником. **Цель работы.** Определение и сравнение на основе моделирования предельно достижимых точностных параметров автоколлиматора с маркой в виде одиночной круглой диафрагмы и автоколлиматора с многоэлементной маркой из распределенных вокруг оси диафрагм при расположении отражающего контрольного элемента (плоского зеркала) на расстоянии от 0,05 до 30 м. **Метод.** Последовательная трассировка случайных лучей от плоскости марки до плоскости приемника при двойном проходе через оптические элементы объектива автоколлиматора с промежуточным отражением от зеркала. Определение точностных параметров автоколлиматоров на основе анализа распределения лучей по пикселям матричного приемника. **Основные результаты.** Приведены оценки случайной составляющей результатов моделирования при различных начальных лучевых засветках марки и размерах пикселя матричного приемника. Проведено сравнение результатов моделирования предельно достижимых точностных параметров автоколлиматора с двухлинзовым объективом при использовании одно- и многоэлементной марки. Описан алгоритм обработки изображений элементов марки с выделением оптимального изображения для получения наиболее точного результата углового измерения. Показана возможность существенного увеличения точности угловых измерений и рабочей дистанции автоколлиматора с многоэлементной маркой. **Практическая значимость.** Использование в оптической схеме автоколлиматора «окрашенной» многоэлементной марки позволяет реализовать высокоточный режим угловых измерений при значительной дистанции до зеркала.

Ключевые слова: автоколлиматор, марка, матричный фотоприемник, размер пикселя, погрешность измерений

Ссылка для цитирования: Ловчий И.Л. Моделирование параметров двухкоординатного автоколлиматора с многоэлементной маркой и матричным фотоприемником // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 1. С. 49–65. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-49-65>

Коды OCIS: 080.5692, 110.2960, 120.3930

Modeling the parameters of a two-coordinate autocollimator with a multi-element mark and a matrix photodetector

IGOR L. LOVCHY

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
lovchy@niiioep.ru <http://orcid/0000-0002-8743-5407>

Abstract

Subject of study. Virtual model of a two-coordinate digital autocollimator with a matrix photodetector. **Work purpose.** Determination and comparison, based on modeling, of the maximum achievable accuracy parameters of an autocollimator with a mark in the form of a single round diaphragm and an autocollimator with a multi-element mark of diaphragms distributed around the axis when the reflective control element (flat mirror) is located at a distance from 0.05 to 30 m. **Method.** Sequential tracing of random rays from the plane of the mark to the plane of the receiver during a double pass through the optical elements of the autocollimator lens with intermediate reflection from the mirror. Determination of the accuracy parameters of autocollimators based on the analysis of the distribution of rays over the pixels of the matrix receiver. **Main results.** Estimates of the random component of the simulation results are given for various initial beam illumination of the mark and pixel sizes of the matrix receiver. The results of modeling the maximum achievable accuracy parameters of an autocollimator with a 2-lens objective using a single- and multi-element brand are compared. An algorithm for processing images of mark elements with the selection of the optimal image to obtain the most accurate result of the angular measurement is described. The possibility of a significant increase in the accuracy of angular measurements and the working distance of an autocollimator with a multi-element mark is shown. **Practical significance.** The use of a “colored” multi-element mark in the optical scheme of the autocollimator makes it possible to implement a high-precision mode of angular measurements at a considerable distance from the mirror.

Keywords: autocollimator, mark, matrix photodetector, pixel size, measurement error

For citation: Lovchy I.L. Modeling the parameters of a two-coordinate autocollimator with a multi-element mark and a matrix photodetector [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 1. P. 49–65. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-49-65>

OCIS codes: 080.5692, 110.2960, 120.3930

ВВЕДЕНИЕ

Автоколлиматоры (АК) широко используются в науке и технике для прецизионных угловых измерений благодаря отсутствию механического контакта, высокой точности и простой схемной реализации измерений [1]. Погрешности измерений современных АК составляют от нескольких сотых до единиц угловой секунды [2–6]. Основными источниками погрешности являются аберрации объектива [7, 8], виньетирование обратно отраженного светового пучка [9–11], рефракционные помехи оптического тракта от объектива до контролируемого объекта [12, 13], которые обуславливают зависимость предельного значения угловой погрешности от ширины диапазона измерений и расстояния до отражающего контрольного элемента (КЭ).

Типичная схема цифрового АК состоит из источника света, конденсора, марки, находящейся в фокальной плоскости объектива, светоделителя, объектива и матричного фотоприемника, расположенного в плоскости, сопряженной с плоскостью марки через отражающий КЭ — плоское зеркало. В качестве марки обычно используется круглая или крестообразная диафрагма, расположенная на оптической оси объектива.

При заданном диапазоне угловых измерений размер входной апертуры объектива ограничивает предельную рабочую дистанцию до КЭ, которая в большинстве случаев не превышает нескольких метров. Использование специальных КЭ [14–17] в виде тройных зеркал с углами между зеркалами, немного отличающимися от $\pi/2$, или с неплоскими отражаю-

щими гранями позволяет уменьшить коэффициент преобразования углового перемещения в линейное и тем самым увеличить рабочую дистанцию до КЭ или расширить диапазон угловых измерений. Однако недостатками использования таких КЭ являются снижение интенсивности анализируемого светового пучка в плоскости приемника, высокие требования к взаимным углам установки и качеству отражающих поверхностей КЭ, заметное увеличение погрешности угловых измерений.

Диапазон двухкоординатных угловых измерений может быть расширен при использовании в автоколлимационной схеме многогранного зеркала, плоские отражающие поверхности которого расположены касательно к шаровому сегменту. Однако необходимо принятие специальных мер для идентификации актуальной рабочей грани зеркала, участвующего в построении автоколлимационного изображения марки в плоскости приемника [18].

Альтернативой может быть использование в АК многоэлементной марки, распределенной вокруг его оси, с автоматическим выделением автоколлимационного изображения оптимального элемента для получения наиболее точного результата углового измерения. Целью настоящей работы является определение и сравнение на основе моделирования предельно достижимых точностных параметров АК с маркой в виде осевой круглой диафрагмы и АК с многоэлементной маркой специальной формы при расположении КЭ (плоского зеркала) на расстоянии от 0,05 до 30 м.

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ МАРКИ В ОПТИЧЕСКИХ УГЛОМЕРАХ

1.1. Равномерно распределенная марка

Многоэлементная марка с матричным расположением элементов используется в прецизионном цифровом измерителе угла [19, 20], основанном на регистрации поворота изображений элементов марки на светочувствительной матрице цифровой камеры. Для идентификации ориентации марки относительно квадрантных секторов приемника используются три выделенных элемента, имеющих больший диаметр по сравнению с остальными и расположенных по углам треугольника. Проведен-

ные модельные эксперименты показали принципиальную возможность измерения угла поворота в диапазоне от 0 до 2π с погрешностью до сотых долей угловой секунды.

Преимущества применения многоэлементной марки при измерении автоколлимационных углов обсуждаются в публикации [21]. Использование координатной информации об объекте, распределенной по всему полю изображения, приводит к повышению точности регистрации углового перемещения. Очевидно, что чем больше поперечные размеры марки, тем при больших углах разворота КЭ ее изображение будет хотя бы частично проецироваться на приемную площадку АК. В этом случае при использовании многоэлементной марки с N видимыми на приемнике изображениями отдельных ее элементов случайная составляющая погрешности измерений уменьшается в $N^{1/2}$ раз по сравнению с погрешностью АК с маркой из одного элемента при одновременном почти двукратном расширении диапазона измерений.

1.2. «Окрашенная» марка

В работе [22] предлагается «окрашивать» многоэлементную марку для выделения и анализа изображения оптимального элемента марки, наименее искаженного виньетированием и аберрациями объектива и почти не меняющегося при увеличении расстояния до КЭ. В работе описывается алгоритм выделения такого элемента. Результаты моделирования параметров однокоординатного АК с «окрашенной» распределенной маркой показали возможности существенного снижения систематической погрешности автоколлимационных угловых измерений, расширения диапазона измерений, увеличения рабочей дистанции до КЭ.

Необходимость «окраски» многоэлементной марки обусловлена тем обстоятельством, что при значительном расстоянии до КЭ «видимый» в плоскости приемника фрагмент марки из равномерно расположенных элементов одного размера может состоять лишь из изображений нескольких внутренних (неграничных) элементов, идентифицировать расположение которых в марке в этом случае будет невозможно. Для «окраски» элементов марки могут использоваться изменения диаметра и/или шага сетки диафрагм.

Поскольку при обработке световых пятен — изображений отдельных элементов марки на матричном приемнике, их энергетические центры тяжести распределения облученности (в дальнейшем — центры тяжести) определяются быстрее и точнее, чем размеры самих пятен, при проведении настоящего моделирования использовался вариант марки с равномерным уменьшением шага сетки по координатным осям от центра к периферии. Дополнительным преимуществом такой формы марки является высокая плотность элементов на краях марки. Диаметр отдельного элемента марки составлял 30 мкм, шаг сетки изменялся от 100 до 34 мкм с дискретностью 3 мкм. Общий размер марки — 3,112×3,112 мм, количество элементов в марке — 2209. Размер марки выбран из условия обеспечения двухкоординатных угловых измерений в диапазоне $\pm 10,5'$ при фокусном расстоянии объектива 500 мм.

1.3. Идентификация изображений элементов «окрашенной» марки

Алгоритм идентификации изображений элементов марки в плоскости приемника следующий. Трехмерный массив распределения засветок пикселей матричного приемника фильтруется по критерию контраста: игнорируются пиксели, засвеченные менее предварительно установленного порога, и по критерию виньетирования пятен игнорируются пятна с интегральной засветкой ниже некоторого уровня и/или с размерами, рассчитанными по числу засвеченных пикселей, значительно меньшими размера элемента марки. Далее вычисляются центры тяжести отфильтрованных пятен и расстояния между ними. Последние значения используются для установления соответствия между видимыми пятнами на приемнике и элементами в марке.

Для однозначной идентификации световых пятен в плоскости приемника видимый фрагмент марки должен содержать информацию о двух последовательных промежутках (по каждой координате) между центрами мало искаженных виньетированием или неискаженных изображений элементов марки. Можно показать, что для выполнения этого условия при произвольном угловом положении зеркала диаметр d видимого фрагмента описанной выше марки должен составлять не менее 0,344 мм. При диаметре входного зрачка $D = 50$ мм и

фокусном расстоянии объектива $F = 500$ мм максимальное расстояние L до зеркала, при котором такая ситуация может быть реализована, составляет $L = DF/2d \approx 36$ м. Однако для проведения угловых измерений в диапазонах $\pm 10,5'$ по каждой координате с учетом размера светового пучка на выходе объектива диаметр зеркала в этом случае должен быть не менее 320 мм (дальнейшее моделирование показало, что для точных измерений в диапазоне $\pm 10'$ на дистанции 30 м диаметр зеркала должен быть не менее 255 мм).

На рис. 1 представлены изображения «видимого» на приемнике фрагмента марки при расстоянии до зеркала 30 м и углах разворота зеркала диаметром 255 мм в двух плоскостях $\varphi_x = \varphi_y = 0'$ (а) и $\varphi_x = \varphi_y = 10'$ (б). Изображения элементов марки даны при лучевой засветке элементов порядка 1400 лучей на элемент, диаметр окружностей на рисунке 0,344 мм, центры окружностей находятся в местах оптимального расположения центров тяжести базовых пятен для заданных углов разворота зеркала (алгоритм определения базового пятна будет описан ниже).

1.4. Алгоритм обработки изображений элементов «окрашенной» марки

Алгоритм обработки изображений элементов марки подобен описанному в публикации [22] и состоит в следующем. Исходя из положений идентифицированных пятен на матричном приемнике и положений сопряженных им элементов в марке, определяются средние (предварительные) значения углов разворота КЭ в двух плоскостях φ_x и φ_y

$$\overline{\varphi_x} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{GC_{xi}}{F} + \arctan \frac{\delta_{xi}}{F} \right) / N, \quad (1)$$

$$\overline{\varphi_y} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{GC_{yi}}{F} + \arctan \frac{\delta_{yi}}{F} \right) / N, \quad (2)$$

где GC_{xi} и GC_{yi} — координаты центра тяжести изображения i -го элемента марки относительно центра приемника при углах разворота зеркала φ_x и φ_y , δ_{xi} и δ_{yi} — координаты i -го элемента в марке относительно ее центра, F — фокусное расстояние объектива, N — число идентифицированных пятен в поле зрения приемника. Найденные предварительные

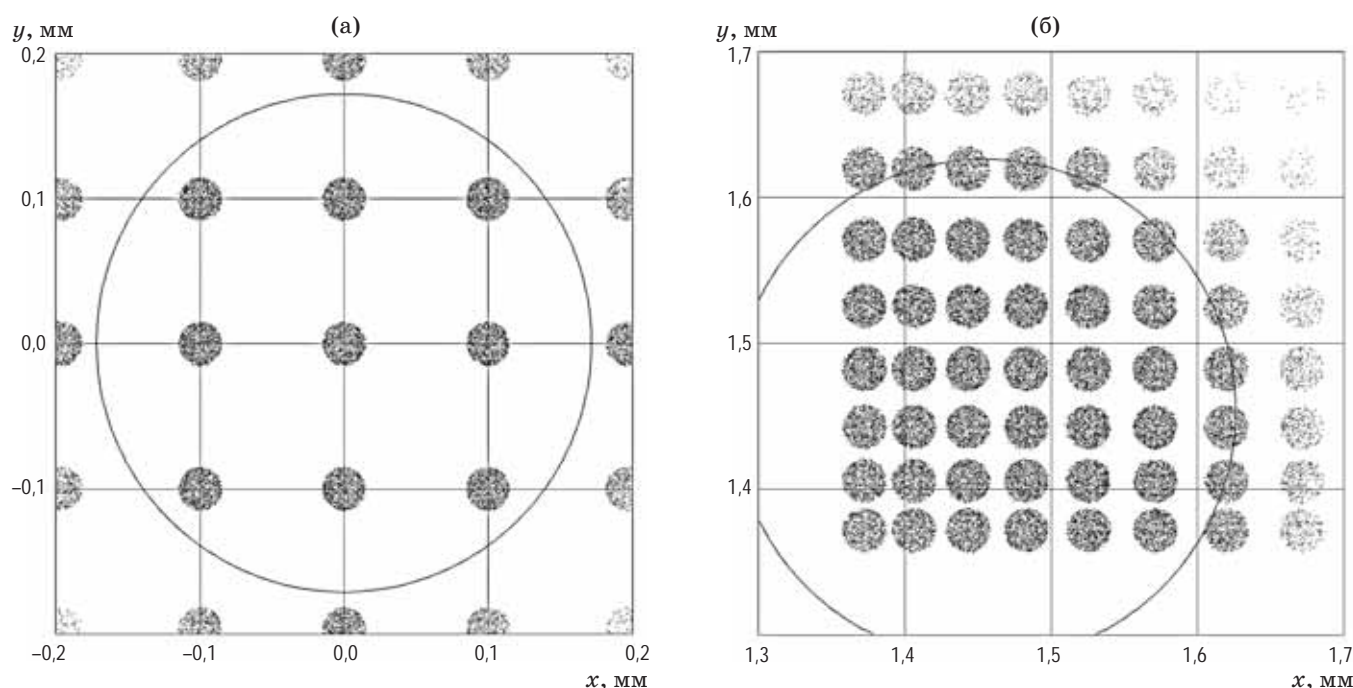


Рис. 1. Фрагменты изображения многоэлементной марки в плоскости приемника при углах разворота зеркала $\varphi_x = \varphi_y = 0'$ (а) и $\varphi_x = \varphi_y = 10'$ (б). Лучевая засветка порядка 1400 лучей на элемент, диаметр окружностей 0,344 мм, центры окружностей находятся в местах оптимального расположения центров тяжести базовых пятен для заданных углов разворота зеркала

Fig. 1. Fragments of the image of a multi-element mark in the plane of the receiver at the angles of the mirror turn (а) $\varphi_x = \varphi_y = 0'$ and (б) $\varphi_x = \varphi_y = 10'$. Radiation illumination is about 1400 rays per element, the circles diameter is 0.344 mm, the circles centers are located in the optimal locations of the gravity centers of the base spots for given angles of rotation of the mirror

значения углов используются для локализации пятна на приемнике, координаты центра тяжести которого наиболее близки к произведениям фокусного расстояния объектива на тангенсы средних значений угловых составляющих. Далее для определения углов разворота зеркала используется координатная информация лишь этого базового пятна и сопряженного с ним базового элемента в марке

$$\varphi_x \equiv \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{GC_{xbase}}{F} + \arctan \frac{\delta_{xbase}}{F} \right), \quad (3)$$

$$\varphi_y \equiv \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{GC_{ybase}}{F} + \arctan \frac{\delta_{ybase}}{F} \right). \quad (4)$$

Зондирующий световой пучок от базового элемента марки после прохождения объектива падает на отражающую плоскость зеркала с минимальным отклонением от ее нормали. Поэтому траектории пучка до и после зеркала

в большой степени совпадают независимо от расстояния до КЭ. С учетом того, что размеры марки во много раз меньше апертуры объектива, зондирующий пучок в этом случае на трассе от марки до приемника дважды проходит практически через центр объектива с минимальными изломами траектории, а значит, без виньетирования и с минимальными осесимметричными аберрационными искажениями. Поэтому результат измерения углового положения КЭ с использованием координатной информации локализованной выше пары пятно/элемент будет наиболее точным.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось методом трассировки лучей через элементы оптического тракта АК: марка – призмный светодели- тель – объектив – подвижный КЭ (зеркало) – объектив – призмный светодели- тель – при-

емник. До проведения виртуальных измерений предварительно оценивалось влияние условий лучевой засветки марки и степени «зернистости» матрицы приемника на достоверность результатов моделирования.

2.1. Засветка марки

Каждый элемент марки засвечивался случайно-распределенными по поверхности (внутри круга с радиусом R) и по направлениям (внутри конуса вокруг оси Z с углом при вершине $0,012$ рад — расходимость пучка на выходе конденсора) лучами, характеризующимися шестью параметрами — координатами начальной точки ($x, y, z = 0$) и направляющими косинусами лучевого вектора ($P_x \ll 1, P_y \ll 1, P_z \approx 1$). Для имитации дифракционного расширения пучка после прохождения малого отверстия с сосредоточением 84% лучей в пятне Эйри к начальным направляющим косинусам добавлялись соответствующие направляющие случайных нормально распределенных лучевых векторов, с вероятностью 84% находящихся в конусе вокруг оси Z с углом при вершине $1,22\lambda/R$, где λ — длина волны излучения. В частности, при моделировании на длине волны 532 нм 84% лучей с каждого элемента марки диаметром 30 мкм в итоге сосредотачивались в конусе с углом при вершине 0,045 рад.

2.2. Преобразования лучей при пересечении оптических поверхностей

Углы преломления (отражения) луча на (от) поверхности находились в приближении геометрической оптики в плоскости, определяемой лучевым вектором и вектором нормали к поверхности в точке пересечения. Весь тракт от марки до приемника программировался в среде LabVIEW. Исходный массив с параметрами лучей последовательно преобразовывался при пересечении оптических поверхностей, отражении от зеркала и обратном пересечении поверхностей. Лучи, выходящие за апертуры оптических элементов, отбрасывались, а на лицевую панель программы выводилась информация о количестве таких лучей. Попадание лучей на пиксели приемника симулировали их освещенность при тех или иных условиях виртуального эксперимента. Возможности компьютера позволяли обрабатывать одновременно до нескольких миллионов лучей.

2.3. Определение нижнего порога засветки марки при моделировании

Оценим минимально необходимый порог лучевой засветки элементов марки. Дело в том, что случайный характер распределения малого количества лучей может привести к значительной статистической погрешности определения энергетического центра тяжести изображения элемента марки в плоскости приемника. Положение центра тяжести пятна по оси X (Y) будем определять как сумму координат точек в пятне, деленную на количество точек.

Ограничим стандартное отклонение случайной погрешности определения углового положения зеркала значением 0,005". При фокусном расстоянии объектива автоколлиматора 500 мм с учетом отклонения луча при отражении на двойной угол такая погрешность соответствует неопределенности регистрации центра тяжести изображения элемента марки в плоскости приемника $\pm 0,024$ мкм (с вероятностью 68%). В работе [22] показано, что для получения неопределенности $\pm \Delta$ положения центра тяжести промежутка (полосы) шириной a число точек N , случайно распределенных по этому промежутку, должно составлять

$$N = \frac{a^2}{12\Delta^2}. \quad (5)$$

Очевидно, что при переходе от элемента марки в виде полосы шириной a к элементу в виде квадрата со стороной a неопределенность $\pm \Delta$ положения центра тяжести по каждой координате также обеспечивается при заполняемости N . Однако при переходе от квадратного элемента марки к круглому с диаметром a неопределенность $\pm \Delta$ регистрации центра тяжести по координатам достигается уже при заполнении $0,75N$. С учетом этого для обеспечения указанной выше неопределенности регистрации центра тяжести изображения круглого элемента марки диаметром 30 мкм моделирование будем проводить при лучевой заполняемости элемента $N_0 = 10^5$.

2.4. Влияние пиксельной структуры приемника на точность определения энергетического центра тяжести пятна

Исследуем, как влияют размеры пиксела на точность регистрации центра тяжести изобраа-

жения элемента марки, а значит, и на точность определения углового положения зеркала. Моделирование проведем путем однокоординатного перемещения по пиксельной структуре приемника (в пределах одного пиксела с шагом 0,01 пиксела) светящегося круга диаметром 30 мкм со случайным заполнением излучающими точками ($N_0 = 10^5$) на каждом шаге. Разности между реальными значениями перемещений пятна и вычисленными в соответствии с заполняемостями пикселей пересчитаем в угловые меры при фокусном расстоянии объектива 500 мм и представим в виде соответствующего стандартного отклонения (СКО) погрешности определения углового положения зеркала.

Рассмотрим два варианта фильтрации пикселей по контрасту: 0 (фильтрация отсутствует) и 0,4 (отбрасываются пиксели с освещенностью менее 40% от максимально освещенного пиксела). Введение ненулевого контраста необходимо на практике для обрезания пара-

зитной засветки, бликов и др. Выбор значения контраста 0,4 при моделировании обусловлен критерием наиболее близкого соответствия площади светящегося круга площади засвеченных пикселей на матрице в широком диапазоне вариаций размера пиксела.

На рис. 2 представлены зависимости СКО случайной погрешности определения углового положения зеркала от размера стороны квадратного пиксела приемника (от 0,5 до 10 мкм с шагом 0,1 мкм). Малые точки соответствуют результатам при определении центра тяжести пятна без учета пиксельной структуры и представлены на графике для сопоставления с одновременно полученными результатами с пиксельной обработкой. Полые квадраты соответствуют результатам при нулевом контрасте, сплошные квадраты отражают результаты при контрасте 0,4. Положение центра тяжести пятна на пиксельном приемнике определялось как сумма произведений координат центров пикселей на их

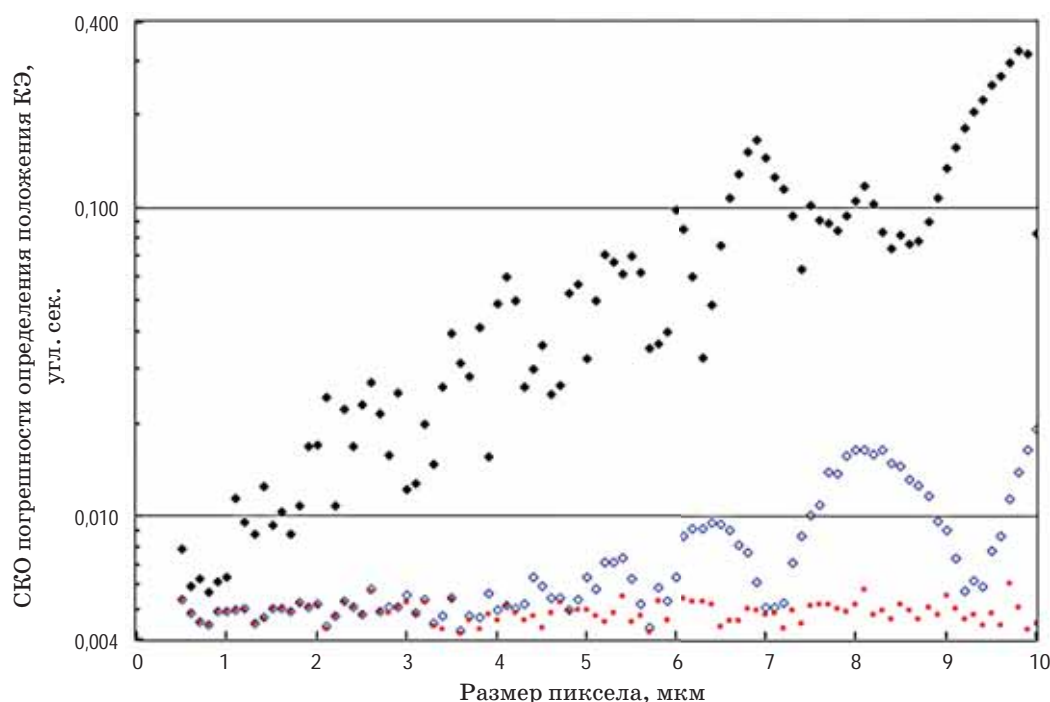


Рис. 2. Результаты моделирования СКО случайной погрешности определения углового положения зеркала от размера стороны квадратного пиксела приемника. Точки — результаты при определении центра тяжести пятна без учета пиксельной структуры, полые квадраты — результаты при нулевом контрасте, сплошные квадраты — результаты при контрасте 0,4

Fig. 2. Results of modeling the standard deviation of the random error in determining the angular position of the mirror on the size of the side of the square pixel of the receiver. Dots are results when determining the center of gravity of a spot without taking into account the pixel structure, hollow squares are results with zero contrast, solid squares are results with a contrast of 0.4

заполняемости, деленная на сумму заполняемостей.

Результаты моделирования показывают, что при нулевом контрасте и размере пиксела много меньше размера пятна размер первого практически не влияет на угловую погрешность вплоть до 3–4 мкм. Далее появляются возрастающие по амплитуде и периоду колебания погрешности, связанные, возможно, с нарушением условия несоизмеримости размеров пятна и пиксела. При учете контраста зависимость угловой погрешности от размера пиксела носит ярко выраженный экспоненциальный характер. Поскольку контрастная фильтрация пикселей соответствует практической ситуации, при моделировании размер пиксела приемника был выбран равным 0,8 мкм, когда неопределенность угловой погрешности, вызванная пиксельной структурой приемника, еще не сильно влияет на результаты моделирования в целом. Напомним, что результаты рис. 2 соответствуют случайной лучевой засветке круга диаметром 30 мкм с заполняемостью $N_0 = 10^5$.

Пикселы размером 0,8×0,8 мкм имеет одна из самых популярных (2019–2020 гг.) видеоматриц мобильных устройств *Sony IMX586* размером 6,4×4,8 мм и количеством пикселей 8000×6000 [23]. Максимальный уровень наполнения пиксела фотонами в линейном режиме работы матрицы — 4500.

Для увеличения отношения сигнал/шум и частоты выдачи информации матрица может работать в режиме биннинга с объединением 4-х пикселей в размер 1,6×1,6 мкм.

3. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА АВТОКОЛЛИМАТОРА

Оптическая схема АК состояла из излучающей марки, призмного светоделителя для разведения прямых и обратных лучей, матричного приемника, объектива и зеркала. В качестве объектива использовался линзовый дублет дифракционного качества с фокусным расстоянием 501 мм и световой апертурой 50,8 мм. Параметры линз дублета и призмного светоделителя были идентичны параметрам, приведенным в работе [24], с коррекцией коэффициентов преломления по используемому в ZEMAX-версии каталогу стекла и с уточнением заднего рабочего отрезка по критерию наилучшей фокусировки. Расчет в ZEMAX проводился при расстоянии до зеркала 50 мм, длине волны 532 нм, коэффициенты преломления стекол: N-BK7 — 1,519473, H-ZF2 — 1,679615, H-K9 — 1,519042. Параметры элементов приведены в табл. 1, указанные в ней коэффициенты, радиусы кривизны поверхностей и толщины были использованы при программировании оптической системы в среде LabVIEW.

Таблица 1. Параметры элементов оптической схемы АК
Table. 1. Parameters of the optical scheme elements of the autocollimator

Номер поверхности	Комментарий	Радиус, мм	Толщина, мм	Стекло	Световой диаметр, мм
1	марка	∞	49,869	—	4,4
2	светоделитель	∞	25,4	N-BK7	25,4
3	—	∞	429,762	—	25,4
4	линза	759,288	3,5	H-ZF2	50,8
5	линза	232,655	5,5	H-K9	50,8
6	—	–289,085	100	—	50,8
7	линза	289,085	5,5	H-K9	50,8
8	линза	–232,655	3,5	H-ZF2	50,8
9	—	–759,288	429,762	—	50,8
10	светоделитель	∞	25,400	N-BK7	25,4
11	—	∞	49,869	—	25,4
12	приемная матрица	∞	—	—	4,8

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОКОЛЛИМАТОРОВ

4.1. Точностные параметры автоколлиматоров с маркой в виде осевой диафрагмы

Диаметр 30 мкм диафрагм многоэлементной марки выбран из условия максимально близкого расположения между собой элементов по краям марки. Обычный размер диафрагмы, используемой в качестве марки типичного АК, — несколько десятых долей миллиметра. При моделировании был выбран компромиссный размер — диаметр 95 мкм, при этом для обеспечения неопределенности угловых измерений не более $\pm 0,005''$ начальная наполняемость лучами была увеличена в 10 раз — до 10^6 лучей. С учетом имитации дифракции на отверстии расходимость лучей после марки составляла около 17 мрад, а на выходе объектива — 0,2 мрад, причем 84% лучей были сосредоточены в пучке диаметром около 9 мм, который на трассе от объектива до зеркала и обратно менялся незначительно. Размер рас-

положенного по оси АК зеркала обеспечивал отражение всех лучей в обратном направлении ($\varnothing > 50$ мм).

На рис. 3 представлены результаты моделирования систематической погрешности измерения разворота зеркала в горизонтальной плоскости $\Delta\varphi_x$ при вертикальном положении зеркала на разных дистанциях до КЭ. Диапазон разворота зеркала $\pm 10'$, шаг разворота $1'$. При определении центра тяжести изображения марки не учитывалась неоднородность освещенности пикселей в пятне, в противном случае систематическая погрешность заметно увеличивалась при частичном экранировании лучей на оправе объектива.

При отсутствии виньетирования возрастание погрешности на краях диапазона обусловлено только аберрациями объектива. В условиях виньетирования рост погрешности усиливается, и при попадании более 50% лучей за пределы входной апертуры объектива результаты измерений становятся некорректными. Поэтому такие результаты на рисунке не показаны.

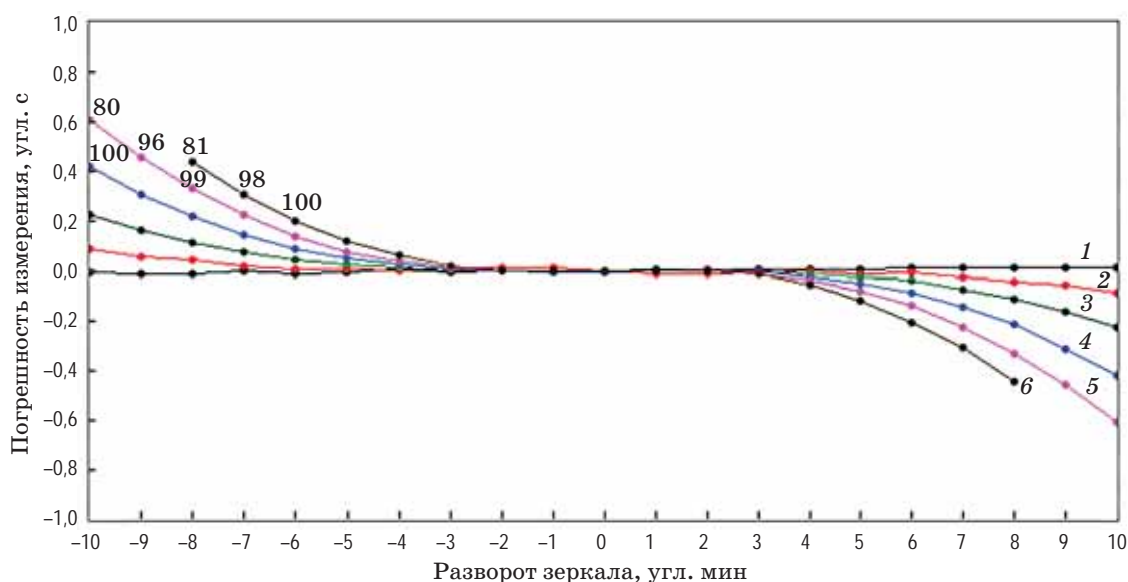


Рис. 3. Результаты моделирования систематической погрешности измерения разворота зеркала в горизонтальной плоскости при вертикальном его положении. Дистанции до КЭ (зеркало) 0,05 (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5) и 5 (6) м. Числа рядом с результатами погрешности на левом крае диапазона измерений соответствуют относительным долям (в процентах) лучей, отраженных зеркалом и прошедших обратно через входную апертуру объектива

Fig. 3. Simulation results of the systematic error in measuring the mirror rotation in the horizontal plane with the mirror in the vertical position. Distances to the control element (a mirror) are (1) 0.05, (2) 1, (3) 2, (4) 3, (5) 4 and (6) 5 m. The numbers next to the error results on the left edge of the measurement range correspond to relative fractions (percentage) of rays reflected by the mirror and passing back through the input aperture of the lens

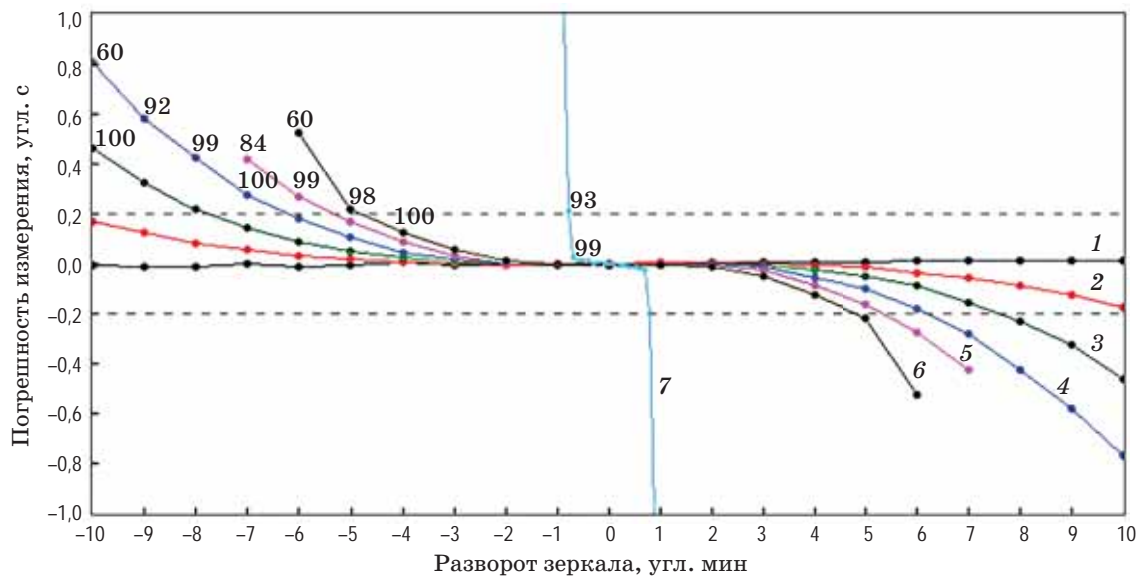


Рис. 4. Результаты моделирования погрешностей измерения поворота зеркала при синхронном развороте его по двум осям. Дистанции до КЭ 0,05 (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5), 5 (6) и 30 (7) м. Числа рядом с результатами погрешности на левом крае диапазона измерений соответствуют относительным долям (в процентах) лучей, отраженных зеркалом и прошедших обратно через входную апертуру объектива. Пунктирные линии ограничивают диапазон погрешностей $\pm 0,2''$

Fig. 4. Simulation results of the measurement error of the mirror rotation during its synchronous rotation along two axes. Distances to the control element are (1) 0.05, (2) 1, (3) 2, (4) 3, (5) 4, (6) 5 and (7) 30 m. The numbers next to the error results on the left edge of the measurement range correspond to relative fractions (percentage) of rays reflected by the mirror and passing back through the input aperture of the lens. Dashed lines limit the error range $\pm 0,2''$

При расстоянии до зеркала 50 мм погрешность $\Delta\varphi_x$ составляет не более $\pm 0,02''$. Такой результат контрастирует с результатами моделирования, полученными в работе [24], где систематическая погрешность измерений, обусловленная по мнению авторов аберрациями объектива, в диапазоне измерений $\pm 500''$ имела линейный характер и достигала $\pm 0,738''$. Вероятно, в работе использовалось некорректное значение масштабного коэффициента преобразования линейного смещения в угловое (неверное значение фокусного расстояния объектива). Так, при замене реального значения фокусного расстояния описанного выше дублета 500,745 мм на 500,01 мм расчетная систематическая угловая погрешность на краях диапазона измерений $\pm 500''$ составит $\pm 0,738''$ с линейной вариацией внутри диапазона.

При малом расстоянии (50 мм) до развернутого на $10'$ зеркала обратно отраженный пучок проходит практически через центр объектива, и аберрации последнего симметрично искажают равноудаленные от оси пучка лучи. Форма

и засветка пятна в плоскости приемника остаются симметричными. Ситуация меняется при значительном расстоянии до зеркала, когда отраженный пучок в плоскости входной апертуры заметно смещается относительно оси объектива. В этом случае равноудаленные от оси пучка лучи оказываются уже на разном расстоянии от оси объектива, и аберрации искажают их по-разному. Симметричность пятна в плоскости приемника нарушается, и центр тяжести пятна смещается, приводя к систематической погрешности углового измерения.

На рис. 4 представлены результаты моделирования погрешности измерения поворота зеркала $\Delta\varphi_x$ (или $\Delta\varphi_y$) при синхронном развороте его по двум осям в диапазоне $\pm(10' \times 10')$ на разных дистанциях до КЭ (шаг поворота зеркала $0,1'$).

Как видно из рис. 3 и 4, с увеличением дистанции до зеркала диапазон точных измерений АК уменьшается. Так, если ограничить погрешность измерений значением $\pm 0,2''$, то диапазон двухкоординатных измерений с ука-

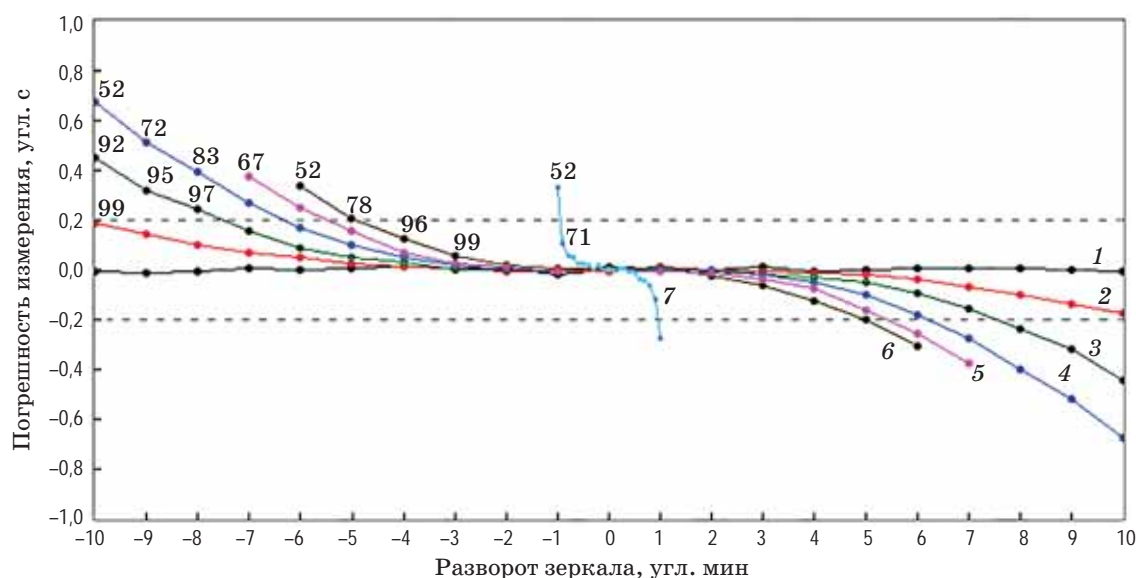


Рис. 5. Результаты измерения углового положения зеркала при синхронном развороте его по двум осям для АК с маркой диаметром 30 мкм. Дистанции до КЭ 0,05 (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5), 5 (6) и 30 (7) м. Числа рядом с результатами погрешности на левом крае диапазона измерений соответствуют относительным долям (в процентах) лучей, отраженных зеркалом и прошедших обратно через входную апертуру объектива. Пунктирные линии ограничивают диапазон погрешностей $\pm 0,2''$

Fig. 5. The results of measuring the angular position of the mirror during its synchronous rotation along two axes for the autocollimator with a mark with a diameter of 30 μm . Distances to the control element are (1) 0.05, (2) 1, (3) 2, (4) 3, (5) 4, (6) 5 and (7) 30 m. The numbers next to the error results on the left edge of the measurement range correspond to relative fractions (percentage) of rays reflected by the mirror and passing back through the input aperture of the lens. Dashed lines limit the error range $\pm 0.2''$

занной погрешностью на дистанции 1 м составляет около $\pm 10,4'$ (исходя из результатов измерений в расширенном диапазоне), на 2-х м он сужается примерно до $\pm 7,8'$, на 3-х — до $\pm 6,2'$, на 4-х — до $\pm 5,3'$, на 5-ти — до $\pm 4,8'$. На расстоянии нескольких метров ограничение диапазона точных измерений достаточно хорошо описывается обратной зависимостью ширины диапазона от квадратного корня из расстояния до зеркала. Однако на дистанции 30 м ширина диапазона точных измерений составляет только $\pm 0,8'$.

Результаты моделирования погрешности измерений, представленные на рис. 3 и 4, хорошо коррелируют с заявленными точностными характеристиками цифровых автоколлиматоров ведущих фирм-производителей при близких параметрах объективов (апертура, фокусное расстояние) [4–6].

Представляют интерес результаты моделирования погрешности измерений при использовании в качестве марки диафрагмы диаметром 30 мкм с той же плотностью заполнения

лучами (всего 10^5 лучей). Расходимость пучка после марки составляет 45 мрад, на выходе объектива — 0,06 мрад, причем 84% лучей сосредоточены в пучке диаметром 22,4 мм. На рис. 5 представлены графики погрешности измерения поворота зеркала при синхронном развороте его по двум осям в диапазоне $\pm(10' \times 10')$.

Сравнение рис. 4 и 5 свидетельствует в пользу применения марки малого размера. В этом случае диаметр зондирующего пучка после объектива больше, и при том же уровне виньетирования обратного пучка на оправе объектива неэкранированная часть пучка расположена в целом ближе к оси объектива, чем аналогичная часть пучка от марки большого размера, а значит, aberrации проявляются меньше.

Таким образом, класс точности АК с маркой в виде осевой диафрагмы при фиксированном диапазоне измерений определяется дистанцией до зеркала. Очевидно, что использование поправки для автоматической коррекции

показаний АК на всех рабочих расстояниях до КЭ проблематично ввиду широкого разнообразия кривых погрешности.

4.2. Точностные параметры автоколлиматора с многоэлементной маркой

Возможности используемого при моделировании компьютера не позволяли анализировать одновременно все лучи от всех элементов марки при их минимальной заполняемости $N_0 = 10^5$ ($2209 \times 10^5 \approx 221$ млн лучей). Поэтому при моделировании реакции АК этап идентификации пятен считался выполненным, и засвечивался только тот элемент в марке, координаты которого были наиболее близки к произведениям фокусного расстояния объектива на тангенсы актуальных углов поворота зеркала по двум направлениям — базовый элемент. Позже на примере анализа фрагмента изображения марки с базовым элементом и расположенными рядом пятнами, сформированными после отражения от находящегося на расстоянии 30 м зеркала диаметром 75 мм, будет показано, что идентификация пятен не вызывает принципиальных затруднений.

Для выравнивания начальных условий прохождения лучей от элементов марки через

линзовый дублет перед маркой дополнительно устанавливалась коллективная линза с фокусным расстоянием, равным фокусному расстоянию дублета. Как показало дальнейшее моделирование, установка такого коллектива приводила к уменьшению расчетных диапазонов погрешности измерений примерно на $\pm(0,01''-0,015'')$ за счет исчезновения небольшой систематической составляющей.

Координаты центра базового элемента в марке и центра тяжести его изображения на приемнике (в «серых» пикселях, т.е. без учета их освещенности) использовались для вычисления актуального угла разворота зеркала. Для более точной прорисовки возможных выбросов погрешности измерения при переходе от одного базового элемента к другому шаг разворота зеркала при сканировании был выбран $0,1'$.

На рис. 6 представлены обобщенные результаты погрешности измерения углового положения зеркала ($\Delta\varphi_x$ и $\Delta\varphi_y$) при развороте зеркала диаметром 255 мм в горизонтальной плоскости и расстояниях до него 1 и 30 м. Моделирование проводилось для четырех положений зеркала по вертикали в процессе разворота по горизонту: $\varphi_y = 0'$, $\varphi_y = -10'$, $\varphi_y = +10'$ и $\varphi_y = \varphi_x$ (разворот по диагонали). Среднеквадратиче-

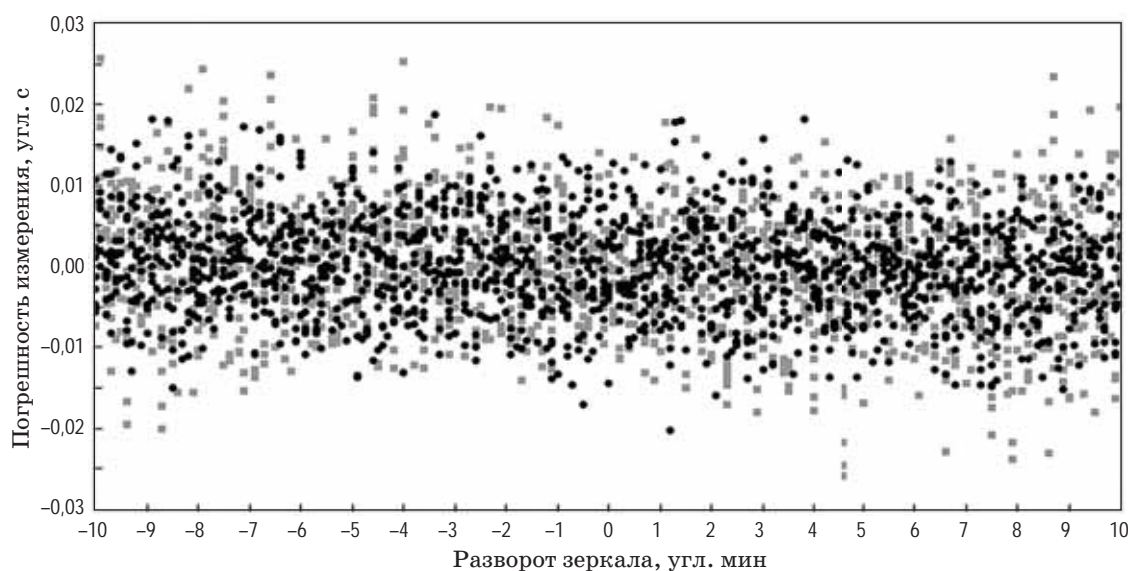


Рис. 6. Результаты моделирования погрешностей измерения углового положения зеркала АК с многоэлементной маркой при расстояниях до него 1 м (черные точки) и 30 м (серые точки). Диаметр зеркала 255 мм

Fig. 6. Results of modeling errors in measuring the angular position of a mirror by an autocollimator with a multi-element mark at a distance of (black dots) 1 m and (gray dots) 30 m. Mirror diameter 255 mm

Таблица 2. Диапазоны и погрешности измерений углов при диаметре зеркала 75 мм

Table 2. Ranges and errors of measurements of angles with a mirror diameter of 75 mm

Дистанция до КЭ, м	0,05–9	10	15	20	25	30
Диапазон измерений	$\pm 10'$	$\pm 9,0'$	$\pm 6,1'$	$\pm 4,6'$	$\pm 3,5'$	$\pm 2,9'$
Погрешность, не более	$\pm 0,03''$	$\pm 0,03''$	$\pm 0,02''$	$\pm 0,02''$	$\pm 0,02''$	$\pm 0,02''$

ские отклонения погрешностей измерения углов по горизонту (σ_h) и по вертикали (σ_v) для дистанции 1 м в указанных случаях составляли: $\sigma_h = 0,0065''$, $\sigma_v = 0,0044''$; $\sigma_h = 0,0063''$, $\sigma_v = 0,0052''$; $\sigma_h = 0,0057''$, $\sigma_v = 0,0059''$ и $\sigma_h = 0,0066''$, $\sigma_v = 0,0067''$. То есть разброс погрешностей был обусловлен, в основном, статистической неопределенностью положений центров тяжести пятен при лучевой заполняемости элементов 10^5 . На дистанции 30 м СКО погрешностей измерения углов составили: $\sigma_h = 0,0076''$, $\sigma_v = 0,0048''$; $\sigma_h = 0,0085''$, $\sigma_v = 0,0061''$; $\sigma_h = 0,0079''$, $\sigma_v = 0,0061''$ и $\sigma_h = 0,0092''$, $\sigma_v = 0,0092''$.

Аналогичные результаты были получены и для других расстояний до зеркала в диапазоне 0,05–30 м с максимальным разбросом погрешности измерений не более $\pm 0,03''$.

Следует отметить, что поскольку зондирующий пучок от базового элемента марки дважды проходит через центр объектива-дублета, освещенность пикселей в изображении этого элемента на приемнике практически равномерна, и угловые погрешности при обработке «цветных» (т.е. с учетом освещенности) или «серых» (без учета освещенности) пикселей базового пятна различаются незначительно.

Конечно, изготовление большого по размерам зеркала с качественной отражающей поверхностью является достаточно дорогостоящим и трудоемким процессом. Поэтому моделирование проводилось также для зеркала диаметром 75 мм — размер стандартного КЭ в комплектации унифицированных автоколлиматоров типа АКУ [25].

Для отбрасывания недостоверных результатов в условиях потенциального виньетирования лучей на зеркале возможны два варианта ограничения диапазона корректных измерений при больших расстояниях до КЭ. Первый — исходя из таблицы известных угловых погрешностей для дискретных расстояний до зеркала. Второй — автоматическое

определение и отбрасывание недостоверных результатов по результатам анализа изображения базового элемента. Одним из критериев здесь может быть неравенство площади засвеченных пикселей в анализируемом пятне площади элемента марки при уровне контраста 0,4.

Представленные в табл. 2 итоги моделирования погрешности регистрации положения зеркала, разворачивающегося синхронно по двум осям (по диагонали), даны с условием отбрасывания результатов, полученных с использованием координат базового пятна с площадью засвеченных пикселей менее 97% от площади элемента марки. По мере уменьшения относительной площади пятна такие результаты характеризуются появлением и возрастанием систематической составляющей в погрешности, а также увеличением доли случайной составляющей. Дальнейший анализ результатов моделирования для различных дистанций до зеркала показал, что относительная площадь базового пятна по засвеченным пикселям свыше 97% обеспечивается при отражении зеркалом более 50% лучей от базового элемента марки.

При расположении зеркала на расстоянии до 9 м точные измерения обеспечиваются во всем диапазоне углов $\pm 10'$. Далее диапазон точных измерений уменьшается обратно пропорционально расстоянию до зеркала. Для пояснения механизма автоматического отбрасывания некорректных результатов на рис. 7 представлены графики погрешности измерений, относительной пиксельной площади базового пятна и доли лучей от базового элемента марки, отраженных зеркалом. Дистанция до зеркала — 30 м.

В диапазоне измерений $\pm 2,9'$ погрешность составляет не более $\pm 0,02''$, относительная площадь базового пятна — от 98,3 до 100,6% от площади элемента в марке, доля лучей от базового элемента в марке, отраженных от зер-

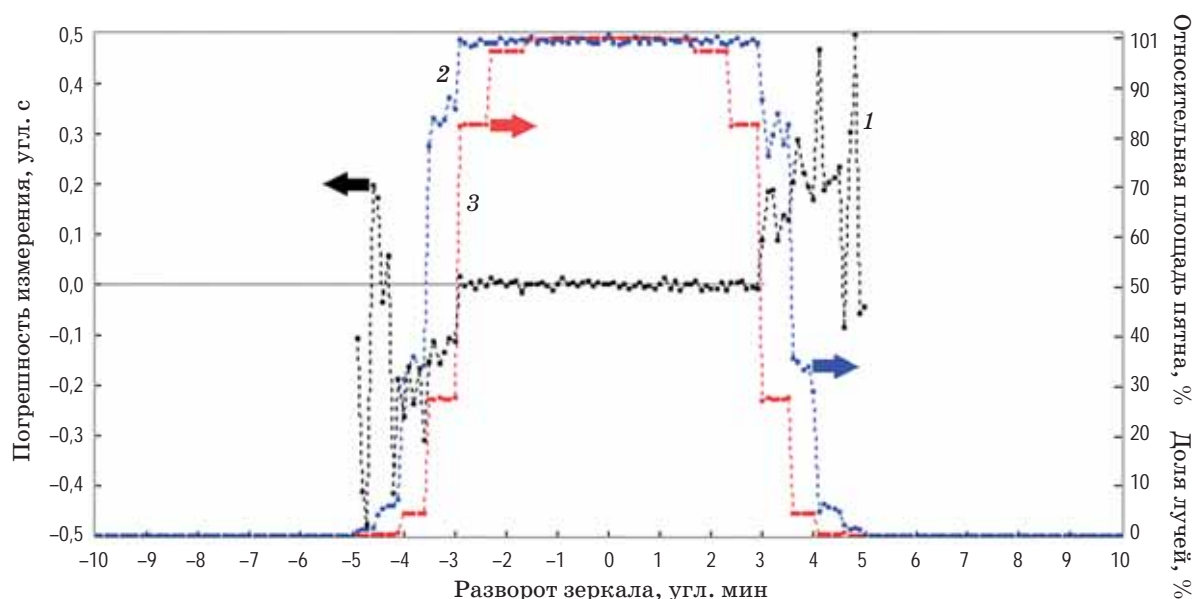


Рис. 7. Зависимости погрешности измерений (1), относительной пиксельной площади базового пятна (2) и доли лучей от базового элемента марки (3), отраженных зеркалом, от угла контролируемого диагонального разворота зеркала. Дистанция до зеркала — 30 м

Fig. 7. Dependences of (1) the measurement error, (2) the relative pixel area of the base spot and (3) the proportion of rays from the base element of the mark, reflected by the mirror, on the angle of the controlled diagonal rotation of the mirror. Distance to the mirror (control element) is 30 m

кала, не менее 82,5%. При расширении диапазона измерений до $\pm 3,5'$ погрешность увеличивается до $\pm 0,2''$, площадь пятна уменьшается до 76–88%, а доля отраженных зеркалом лучей — до 28%. При дальнейшем расширении диапазона измерений до $\pm 4'$ погрешность растет до $\pm 0,3''$, площадь анализируемого пятна уменьшается до 29–36 %, а доля отраженных лучей — до 4,5%. Здесь следует отметить еще один плюс проведения моделирования с пикселом малого размера — высокая стабильность результатов определения площади базового пятна по числу засвеченных пикселей при отражении зеркалом более 50% лучей от базового элемента марки. При моделировании с пикселом увеличенного размера возрастает шумовая составляющая относительного значения площади, и автоматический отброс недостоверных результатов становится проблематичным.

Очевидно, что нахождение оптимального контраста и установление критерия отброса некорректных результатов в случае реального АК с многоэлементной маркой будут существенно сложнее ввиду влияния многих факторов (погрешность изготовления марки,

неравномерности ее засветки и чувствительности пикселей, темновые шумы, разрядность аналого-цифрового преобразователя и др.), не рассматриваемых при настоящем моделировании.

Переходы по «ступенькам» на кривой зависимости доли отраженных лучей от угла поворота зеркала соответствуют сменам базовых пятен при развороте зеркала (в центре диапазона такие переходы не прописываются, поскольку все лучи от центральных элементов марки отражаются от зеркала). Как видно из рис. 7, даже при сильном виньетировании, когда доля отраженных зеркалом лучей составляет лишь несколько процентов, точность измерения центров тяжести пятен остается достаточно высокой (в угловой мере — доли секунды), что дает возможность использовать и эти пятна для установления соответствия между элементами в марке и их изображениями на приемнике согласно п. 1.3.

Продemonстрируем процесс идентификации пятен в плоскости приемника и определения среди них базового на примере анализа фрагмента изображения марки при рас-

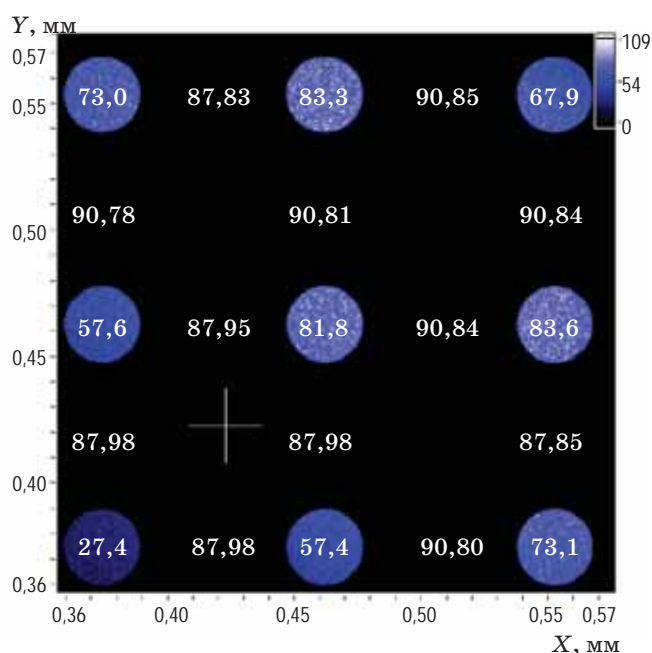


Рис. 8. Фрагмент изображения многоэлементной марки в плоскости приемника при углах разворота зеркала $\varphi_x = \varphi_y = 2,9'$. Числа в пятнах показывают относительное количество лучей (в процентах), прошедших весь оптический тракт от элемента марки до его изображения на приемнике, числа между пятнами — вычисленные расстояния (в микрометрах) между центрами «серых» пятен (т.е. без учета освещенности пикселей). Крест на рисунке обозначает место оптимального расположения базового пятна исходя из найденных угловых составляющих

Fig. 8. A fragment of the image of a multi-element mark in the plane of the receiver at the angles of the mirror rotation $\varphi_x = \varphi_y = 2,9'$. The numbers in the spots are the relative number of rays (percentage) that have passed the entire optical path from the mark element to its image on the receiver; the numbers between the spots are the calculated distances (in micrometers) between the centers of the “gray” spots (i.e., excluding pixel illumination). The cross in the figure indicates the optimal location of the base spot based on the found angular components

стоянии до зеркала 30 м, диаметре зеркала 75 мм, углах поворота зеркала $\varphi_x = \varphi_y = 2,9'$. На рис. 8 представлен фрагмент изображения многоэлементной марки в плоскости приемника в виде девяти максимально ярких пятен с тоновым распределением пикселей по освещенности, полученным после фильтрации пикселей с освещенностью менее 0,05 от максимальной.

Актуальные расстояния между элементами марки составляли 88 и 91 мкм, т.е. погрешность их определения по изображениям элементов не превышает 0,22 мкм (в данном конкретном случае), что при дискретности 3 мкм изменения расстояний между элементами марки говорит об уверенной идентификации пятен при работе на максимальном рабочем расстоянии.

Средние значения углов разворота зеркала, вычисленные для пятен на рис. 8 по формулам (1) и (2), составляют $\overline{\varphi_x} \approx \overline{\varphi_y} \approx 2,8997'$. Крест на рисунке обозначает место оптимального расположения базового пятна исходя из найденных угловых составляющих ($x = y = F \tan(2,8997') \approx 0,422$ мм). Ближайшее к кресту пятно находится в центре фрагмента — актуальное в данный момент базовое пятно. После локализации этого пятна проводится его дополнительная обработка в виде повторной фильтрации (отсеивания) пикселей с освещенностью менее 40% от максимальной освещенности в пятне. В результате площадь оставшихся засвеченных пикселей пятна составила 99,3% от площади элемента в марке, а результаты измерения углов разворота зеркала в двух плоскостях составили $173,993''$ и $173,991''$.

Если при некотором угле поворота зеркала среди видимых в плоскости приемника изображений элементов марки нет базового пятна или вообще количества «качественных» пятен недостаточно для выполнения условий их идентификации, то такой угол автоматически находится вне диапазона точных измерений АК.

Таким образом, использование специальной многоэлементной марки позволяет реализовать высокоточные автоколлимационные измерения на больших расстояниях до контролируемого зеркала. Максимальная дистанция измерений ограничивается условием идентификации видимых на приемнике пятен и определяется размером апертуры объектива и максимальным шагом сетки элементов марки автоколлиматора. Ширина диапазона высокоточных измерений определяется размерами зеркала, марки и приемника. При работе на большой дистанции с зеркалом ограниченного размера возможна автоматическая корректировка ширины диапазона высокоточных измерений для отбрасывания недостоверных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сравнительного моделирования предельных точностных параметров автоколлиматора с маркой в виде осевой диафрагмы и автоколлиматора с многоэлементной «окрашенной» маркой показана возможность существенного повышения во втором случае точности угловых измерений при больших (до десятков метров) расстояниях до зеркала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аникст Д.А., Костантинович К.М., Меськин И.В. и др. Высокоточные угловые измерения / Под ред. Якушенкова Ю.Г. М.: Машиностроение, 1987. 480 с. Anikst D.A., Kostantinovich K.M., Meskin I.V., et al. High-precision angular measurements [in Russian] / Ed. by Yakushenkov Yu.G. Moscow: "Mashinostroenie" Publ., 1987. 480 p.
2. Унифицированный ряд цифровых двухкоординатных автоколлиматоров ОПТРО-АК [Электронный ресурс] // <http://www.optrotech.ru/prod1-4.php> (дата обращения: 06.03.2023). Unified range of digital two-coordinate autocollimators ОПТРО-АК [Electronic resource] // <http://www.optrotech.ru/prod1-4.php> (access date: 06/03/2023).
3. Автоколлиматоры АК-025М, АК-025, АК-05 [Электронный ресурс] // <http://intertech-ltd.com/автоколлиматоры-ак-01-ак-025-и-ак-05> (дата обращения 06.03.2023). Autocollimator АК-025М, АК-025, АК-05 [Electronic resource] // <http://intertech-ltd.com/автоколлиматоры-ак-01-ак-025-и-ак-05> (access date: 06.03.2023).
4. TriAngle Electronic autocollimator for precise optical angle measurement [Электронный ресурс] // <https://trioptics.com/products/triangle-electronic-autocollimators> (дата обращения: 06.03.2023). TriAngle Electronic autocollimator for precise optical angle measurement [Electronic resource] // <https://trioptics.com/products/triangle-electronic-autocollimators> (access date: 06/03/2023).
5. Ultra High Precision Dual Axis Digital Autocollimator [Электронный ресурс] // <https://www.taylor-hobson.com/products/alignment-level/autocollimators> (дата обращения: 06.03.2023). Ultra High Precision Dual Axis Digital Autocollimator [Electronic resource] // <https://www.taylor-hobson.com/products/alignment-level/autocollimators> (access date: 03/06/2023).
6. Electronic autocollimators. Measure with precision. [Электронный ресурс] // https://www.haagstreit.com/fileadmin/Moeller_wedel_optical/Brochures/Electronic_Autocollimators/ELCOMAT__English.pdf (дата обращения: 06.03.2023). Electronic autocollimators. Measure with precision. [Electronic resource] // https://www.haagstreit.com/fileadmin/Moeller_wedel_optical/Brochures/Electronic_Autocollimators/ELCOMAT__English.pdf (access date: 03/06/2023).
7. Richter E. Einfluß der Objektiv-Aberrationen auf die Meßunsicherheit beim Autokollimationsfernrohr [auf Deutsch] // Feingerätetechnik. 1974. Bd. 23. № 6. S. 270–273.
8. Filatov Y.V., Larichev R.A. Aberration influence on accuracy of angle measurements by means of autocollimator // Proc. SPIE. 2015. V. 9525. P. 95253O(1–7). <http://doi.org/10.1117/12.2184726>
9. Хуснутдинов Р.М. Влияние ограничения световых пучков на погрешность измерения следящего фотоэлектрического автоколлиматора // ОМП. 1989. № 7. С. 21–23. Khusnutdinov R.M. The influence of light beam limitation on the measurement error of a tracking photoelectric autocollimator // Journal of Optical Technology. 1989. № 7. P. 21–23.
10. Смахов А.А., Коняхин И.А. Исследование облученности виньетированного изображения в автоколлимационной системе с помощью компьютерного моделирования // Изв. ВУЗов. «Приборостроение». 2013. Т. 56. № 11. С. 11–14. Smekhov A.A., Konyakhin I.A. Study of the irradiance of a vignetted image in an autocollimation system using computer modeling [in Russian] // News of Universities. "Instrument making". 2013. V. 56. № 11. P. 11–14.
11. Li R., Konyakhin I., Zhang Q., et al. Error compensation for long-distance measurements with a photoelectric autocollimator // Opt. Eng. 2019. V. 58. № 10. P. 104112(1–9). <http://doi.org/10.1117/1.OE.58.10.104112>
12. Zhu F., Tan X., Tan J., Cui J. Note: Autocollimation with ultra-high resolution and stability using telephoto objective together with optical enlargement and beam drift compensation // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 086110(1–3). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4961689>
13. Guo Y., Cheng H., Wen Y., et al. Small-angle measurement in laser autocollimation based on a common-path compensation method // J. Modern Opt. 2019. V. 66. № 18. P. 1818–1826. <http://doi.org/10.1080/09500340.2019.1677954>
14. Коняхин И.А., Панков Э.Д. Отражатель для трехкоординатных углоизмерительных устройств // ОМП. 1980. № 2. С. 31–35. Konyakhin I.A., Pankov E.D. Reflector for three-coordinate angle measuring devices // Journal of Optical Technology. 1980. № 2. P. 31–35.
15. Konyakhin I.A., Turgalieva T., Li R. Optic-electronic sensor for measuring the deformations of the axle at the radio-telescope // Proc. SPIE. 2014. V. 9141. P. 914123. <http://doi.org/10.1117/12.2051874>
16. Женьпу Л., Коняхин И.А. Синтез отражателей для автоколлимационных измерений при увеличенной рабочей дистанции // Известия ВУЗов. «Приборостроение». 2002. Т. 45. № 11. С. 45–47. Zhenpu L., Konyakhin I.A. Synthesis of reflectors for autocollimation measurements at an increased working

- distance [in Russian] // News of Universities. "Instrument making". 2002. V. 45. № 11. P. 45–47.
17. Li R., Zhou M., Konyakhin I., et al. Cube-corner autocollimator with expanded measurement range // Opt. Exp. 2019. V. 27. № 5. P. 6389–6403. <http://doi.org/10.1364/OE.27.006389>
18. Бондаренко И.Д. Автоколлиматор // А.с. № SU 1089407 А. Бюл. изобр. 1984. № 16. Bondarenko I.D. Autocollimator // Copyright Certificate № SU 1089407 A. Bulletin of Inventions. 1984. № 16.
19. Королев А.Н., Лукин А.Я., Полищук Г.С. Новая концепция измерения угла. Модельные и экспериментальные исследования // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 6. С. 52–58. Korolev A.N., Lukin A.Ya., Polishchuk G.S. New concept of angular measurement. Model and experimental studies // Journal of Optical Technology. 2012. V. 79. P. 352–356. <http://doi.org/10.1364/JOT.79.000352>
20. Бохман Е.Д., Венедиктов В.Ю., Королев А.Н., Лукин А.Я. Цифровой измеритель угла с двумерной шкалой // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 5. С. 19–25. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-05-19-25> Bokhman E.D., Venediktov V.Yu., Korolev A.N., Lukin A.Ya. Digital goniometer with a two-dimensional scale // Journal of Optical Technology. 2018. V. 85. P. 269–274. <http://doi.org/10.1364/JOT.85.000269>
21. Королев А.Н., Лукин А.Я., Полищук Г.С. Использование информационной избыточности в оптических цифровых измерительных системах с 2D-сенсором // Измерительная техника. 2017. № 3. С. 29–33. Korolev A.N., Lukin A.Ya., Polishchuk G.S. Use of information redundancy in optical digital measurement systems with 2D sensor // Measurements Techniques. 2017. V. 60. № 3. P. 242–247.
22. Ловчий И.Л. Моделирование широкодиапазонного однокоординатного автоколлиматора с протяженной маркой и приемником в виде линейки фоточувствительных элементов // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 11. С. 56–65. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-11-56-65> Lovchy I.L. Modeling a broad-band single-coordinate autocollimator with an extended mark and a detector in the form of a linear-array camera // Journal of Optical Technology. 2021. V. 88. P. 654–660. <http://doi.org/10.1364/JOT.88.000654>
23. Sony IMX586-AAJH5-C [Электронный ресурс] // [https://whycan.com/files/members/466/IMX586-AAJH5-C_0.0.1_Datasheet\(1\).pdf](https://whycan.com/files/members/466/IMX586-AAJH5-C_0.0.1_Datasheet(1).pdf) (дата обращения: 06.03.2023). Sony IMX586-AAJH5-C [Electronic resource] // [https://whycan.com/files/members/466/IMX586-AAJH5-C_0.0.1_Datasheet\(1\).pdf](https://whycan.com/files/members/466/IMX586-AAJH5-C_0.0.1_Datasheet(1).pdf) (access date: 03/06/2023).
24. Shi J., Li Y., Zhang D., Xing H. Research on the influence model of collimating lens aberrations in autocollimation system based on the ray-tracing method // IEEE Sensors J. 2023. V. 23. № 2. P. 1224–1233. <http://doi.org/10.1109/JSEN.1022.32244730>
25. Автоколлиматоры унифицированные АКУ [Электронный ресурс] // <https://npzoptics.ru/files/AKY-02%20-05%20-1.pdf> (дата обращения: 06.03.2023). Unified autocollimators AKY [Electronic resource] // <https://npzoptics.ru/files/AKY-02%20-05%20-1.pdf> (access date: 03/06/2023).

АВТОР

Игорь Леонидович Ловчий — кандидат физико-математических наук, начальник отдела, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <http://orcid/0000-0002-8743-5407>; lovchy@niioep.ru

AUTHOR

Igor L. Lovchy — PhD (Physics and Mathematics), Department Head, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <http://orcid/0000-0002-8743-5407>; lovchy@niioep.ru

Статья поступила в редакцию 21.04.2023

Одобрена после рецензирования 05.08.2023

Принята к печати 24.11.2023

The article was submitted to the editorial office 21.04.2023

Approved after review 05.08.2023

Accepted for publication 24.11.2023