

УДК 681.7.014.2; 681.7.014.3; 681.7.013.2; 681.2.083

А. В. ФЕСЕНКО, д. т. н. В. Н. БОРОВИЦКИЙ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: vborovytsky@yahoo.com

ВИЗУАЛЬНЫЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ АВТОКОЛЛИМАТОРЫ

Показаны преимущества оптико-электронных автоколлиматоров перед визуальными. Рассмотрена возможность модернизации существующих визуальных систем путем замены автоколлимационных окуляров на блоки с многоэлементными приемниками и подключения их к компьютеру. Приведены краткие характеристики автоколлимационных окуляров и современных оптико-электронных автоколлиматоров.

Ключевые слова: автоколлиматоры, оптико-электронные системы, многоэлементные фотоприемники.

Метод дистанционного измерения угловых величин широко используется в производстве, при сборке и юстировке оптических приборов, направляющих прямолинейного движения, отсчетных зубчатых соединений, взаимного расположения баз, центрирования элементов оптической системы, контроля точности угломерных приборов, фокусировки телескопических систем, контроля поверхностей оптических элементов, контроля смещений, установки ракет на стартовых позициях и т. п. [1, 2]. Для выполнения таких измерений применяются оптические приборы — автоколлиматоры. Автоколлиматор формирует изображение предмета (сетки с делениями или раstra определенной формы) в бесконечности и измеряет смещение этого изображения, которое сформировано параллельным пучком лучей, отразившихся от рабочей поверхности. Если рабочая поверхность не перпендикулярна оптической оси автоколлиматора, то при малых угловых величинах смещение изображения будет прямо пропорционально углу между оптической осью автоколлиматора и нормалью к поверхности. Преимущество автоколлимационного метода состоит в том, что расстояние до контролируемой поверхности в меньшей степени влияет на точность измерений, чем при использовании других методов.

В настоящее время существует два основных типа автоколлиматоров — визуальные и фотоэлектрические. Визуальные автоколлиматоры отличаются между собой автоколлимационными окулярами [3]. Постоянная потребность в увеличении точности измерений и контроля, автоматизации процессов и уменьшении затрат привела к широкому использованию оптико-электронных автоколлимационных систем. Развитие информационных технологий и достижения в области создания матричных фотоприемников от-

крыло новый этап — этап цифровых автоколлимационных систем. Эти системы существенно упростили регистрацию и обработку автоколлимационного изображения и обеспечили вывод и сохранение результатов измерений при помощи компьютера.

Целью данной статьи является анализ принципов работы автоколлимационных объективов и оптико-электронных автоколлиматоров и их отличий. Такой анализ, на наш взгляд, будет полезен исследователям и метрологам, работающим в области измерения угловых величин, поскольку указывает на возможности модернизации имеющихся визуальных автоколлиматоров и преобразования их в оптико-электронные.

Автоколлимационные измерения

Автоколлиматор можно рассматривать как комбинацию в одном приборе двух оптических систем — коллиматора и зрительной трубы [3]. Эти системы имеют общую оптическую ось, что уменьшает погрешности, вносимые ими по отдельности при измерении, а также позволяет измерять малые углы при небольших удалениях от объекта.

Рассмотрим принцип работы автоколлиматора, используя **рис. 1, а**. Поток излучения, выходящий от источника 1, освещает плоскопараллельную пластину (сетку) 2, объектив 4 формирует изображение сетки, уходящее в бесконечность. Отразившись от контролируемой поверхности 5, параллельный пучок попадает на объектив 4 под углом α . Автоколлимационное изображение сетки будет формироваться в плоскости второй сетки (сетки анализатора) 6. Полученное изображение наблюдается через окуляр 7. Светоделитель 3 служит для разделения осветительного и окулярного каналов. Вид сетки выбирается для каждого конкретного случая

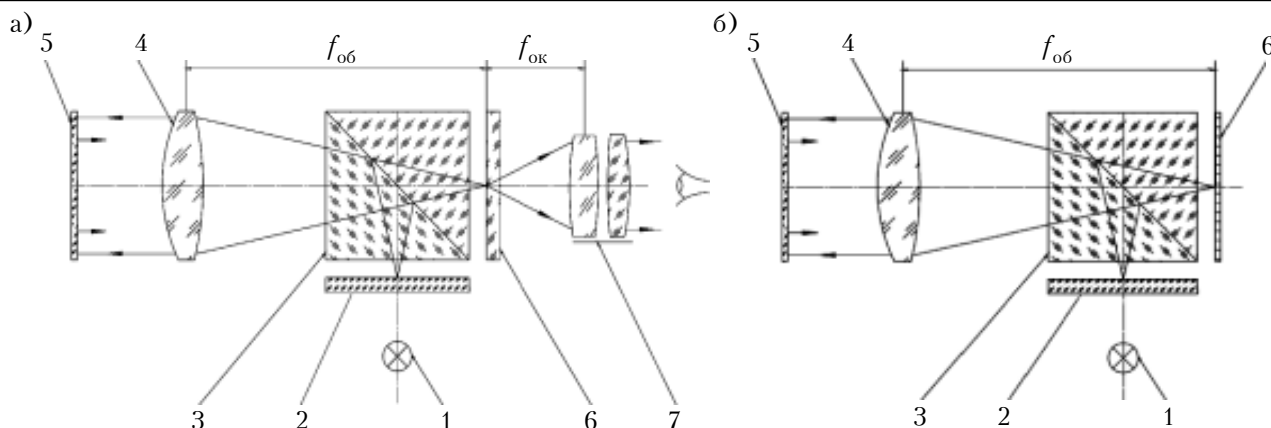


Рис. 1. Оптическая схема визуального (а) и оптико-электронного (б) автоколлиматоров: 1 – источник излучения; 2 – сетка; 3 – светоделитель; 4 – объектив; 5 – контролируемая поверхность; 6 – сетка анализатора; 7 – окуляр

(в виде перекрестия с делениями вдоль каждой оси, с concentрическими кругами, с прозрачной точкой на темном фоне для имитации точечного источника и др.).

Главным достоинством автоколлимационного метода является высокая чувствительность к малым поворотам отражающей поверхности, которая тем больше, чем больше фокусное расстояние объектива автоколлиматора. При измерении малых углов величина смещения изображения сетки прямо пропорциональна фокусному расстоянию (рис. 1). Однако при этом надо учитывать, что автоколлиматоры, как любые оптические изображающие приборы, имеют дифракционное ограничение разрешающей способности.

Автоколлимационные окуляры

Для облегчения проектирования и эксплуатации автоколлиматоров были объединены в один узел сетка (или две сетки), светоделитель и окуляр, который должен обеспечивать удовлетворительную видимость автоколлимационного изображения светящегося или темного штриха сетки. Такой узел называется автоколлимационным окуляром. На практике применяются разные виды автоколлимационных окуляров. Все они отличаются исполнением, имеют различную

яркость автоколлимационного изображения и различное светопропускание. Различают окуляры со свободным, затемненным или частично затемненным полем зрения, с освещенной маркой в центре или вне центра поля. Поскольку существует большое количество справочников по оптическим приборам, в которых рассмотрены, в частности, и автоколлимационные окуляры, ограничимся представлением их параметров в табл. 1.

Оптико-электронные автоколлиматоры

Основным достоинством оптико-электронного автоколлиматора является возможность регистрации изображений и их цифровой обработки. Это позволяет существенно упростить и автоматизировать процесс проведения измерений и контроля, повысить точность измерений. Схема построения современных оптико-электронных автоколлиматоров основывается на использовании светодиода или лазерного диода в качестве источника излучения, многоэлементного фотоприемника и светоделительного элемента в виде призмного светоделителя или полупрозрачной пластинки. Как видно на схеме, показанной на рис. 1, б, изображение формируется не на анализирующей сетке, а в плоскости приемного

Таблица 1

Параметры автоколлимационных окуляров

Вид окуляра	Светопропускание, %	Максимальное видимое увеличение	Расстояние до зеркала, м
Куб с одной сеткой	11	30	25
Куб с двумя сетками	4–9	Не ограничено	18
Гаусса длиннофокусный	14–15	18	18
Гаусса короткофокусный	14–15	18	18
Аббе	30	30	2
Линника	30	Не ограничено	20
Тудоровского	8–10	Не ограничено	7–8
Захарьевского	30	18	18
Монченко	40	30	30

Характеристики современных оптико-электронных автоколлиматоров

Производитель, тип прибора	Источник излучения	R^* , угл. сек.	δ^{**}	Диапазон измерений	Размеры прибора, мм	Цена, тыс. \$
Taylor Hobson, Англия DA20 DA400	Лампа 6В/2Вт Лампа 6В/2Вт	0,01 0,1	0,1'' 0,01''	$\pm 20''$ $\pm 400''$	— длина 240	— —
Trioptics, Германия TriAngle TriAngle LASER TriAngle HS	Светодиод, 530 нм Лазер, 635 нм Лазер, 635 нм	0,01 0,05 0,1	0,75'' 0,2'' 0,8%	$0,61^\circ \times 0,46^\circ$ $660'' \times 490''$ $400''$	— — —	— — —
Moeller-Wedel Optical, Германия ELCOMAT 3000 ELCOMAT HR	Светодиод, 660 нм Светодиод, 660 нм	0,05 0,005	$\pm 0,1''$ $\pm 0,01''$	$2000'' \times 2000''$ (до 2,5 м) $260'' \times 260''$ (до 20 м) $300'' \times 300''$	$420 \times 95 \times 135$ $488 \times 218 \times 141$	— —
Оптротех, Россия, ЦАК-0.1	—	0,001	0,5''	$\pm 5'$	—	—
НПК «Диагностика», Россия, АК-03Ц	—	0,05	0,3''	$20'' \times 15''$	$320 \times 120 \times 160$	10–12
Davidson Optronics, США D-897 D-720	— Сверхъяркий светодиод, 530 нм	$\pm 0,01$ $\pm 0,1$	$\pm 0,01''$ $\pm 0,2''$	$\pm 5''$ $\pm 5'$	— $22 \times 152 \times 318$	— —
Micro-Radian Instruments, США TL-40 TL-160 T-15	Лазерный диод, 670 нм Лазерный диод, 670 нм Светодиод	0,1 0,01 0,1	0,8% 0,8% 0,2%	$\pm 3,600''$ (при 150 мм) $\pm 600''$ (при 5 м) $10800''$ (при 25 мм)	$31 \times 31 \times 120$ $43 \times 43 \times 230$ $31 \times 31 \times 51$	18–20 18–20 18–20
Integrated Equipment Solutions, США, AC 201	Лазер (класс 2), 850 нм	0,2	—	$\pm 344'$	$2,5 \times 2,8 \times 3,3$	—
Newport Corporation, США, LDS-Vector	Лазерный диод, 670 нм	0,02	—	31''	$\varnothing 38$ длина 271	>5
RIPL, Индия, EAMP800	Светодиод, 640 нм	0,01	0,04''	$\pm 300''$	—	26

* R — разрешающая способность; ** δ — погрешность измерений.

устройства, затем преобразуется в электрический сигнал и передается на устройство вывода. В цифровых автоколлиматорах электрические сигналы преобразуются в цифровую форму, обрабатываются и передаются в компьютер для сохранения и визуализации результатов измерений. Существуют и другие схемы построения автоколлиматоров [1–4].

Многоэлементные фотоприемники могут быть матричными и линейными. Основное их различие заключается в том, что из-за большого количества фоточувствительных элементов матричный фотоприемник имеет большее, чем линейный, время стабилизации — около двух часов [4]. Следует отметить, что для получения результата измерений с высокой точностью необходимо при их проведении строго поддерживать темпе-

ратуру матрицы. Для этой цели используют терморегуляторы или холодильники Пельтье.

Хотя на сегодняшний день на рынке оптико-электронных автоколлиматоров представлено много компаний, можно выделить основные: Taylor Hobson (Англия), Trioptics (Германия), Moeller-Wedel Optical (Германия), Оптротех (Россия), НПК «Диагностика» (Россия) и другие. Для сравнения автоколлиматоров разных производителей были выбраны однотипные приборы — цифровые автоколлиматоры небольшого размера, в том числе портативные, аналогичные по конструкции, в которых применяются матричные и линейные многоэлементные фотоприемники [4], осуществляется цифровая обработка сигналов и вывод результатов в компьютер по стандартному интерфейсу USB, COM и др.

Характеристики цифровых автоколлиматоров представлены в табл. 2.

Следует подчеркнуть, что для Украины одним из перспективных направлений развития автоколлимационных систем является модернизация существующих визуальных автоколлиматоров путем замены автоколлимационных окуляров на блоки с многоэлементными приемниками и подключения их к компьютерам. Это позволяет получить оптико-электронные автоколлиматоры по цене намного меньшей, чем цена новых цифровых автоколлимационных систем зарубежного производства. Выполненный авторами сравнительный анализ окуляров показал, что предпочтительными для такой модернизации являются окуляр «куб с одной отдельной сеткой» или окуляр Гаусса (см. табл. 1). При осуществлении модернизации автоколлиматоров рекомендуется использовать проекционный объектив, который переносит изображение сетки в плоскость линейного или матричного фотоприемника. Такой объектив должен обеспечить согласование между промежуточным изображением сетки и ее изображением в плоскости фотоприемника по полю зрения и по пространственному разрешению. Также следует учесть, что проекционные объективы, как правило, формируют перевернутое изображение. После модернизации погрешности измерений остаются примерно на том же уровне, что и в исходном визуальном автоколлиматоре, а появившиеся возможности дистанционной работы, обработки изображений (автоматический расчет угловой величины) и автоматического документирования результатов измерения полностью оправдывают затраты на такую модернизацию. При этом следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев на производстве и в лабораториях требуется выполнять измерения с погрешностями порядка угловой минуты, а не с минимально возможной погрешностью порядка долей угловых секунд. А это существенно расширяет количество визуальных автоколлиматоров, которые могут быть превращены в цифровые оптико-электронные автоколлиматоры. Более подробно модернизация визуальных автоколлиматоров будет рассмотрена в нашей следующей статье.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бурбаев А. М. Методы и средства испытаний, контроля и юстировки оптических приборов. — С.-Пб.: ИТМО, 2007. [Burbaev A. M. Metody i sredstva ispytaniy, kontrolya i yustirovki opticheskikh priborov. S.-Pb. ITMO, 2007]
2. Проспект компании MOELLER-WEDEL OPTICAL GmbH. Examples for Applications of collimators, telescopes, visual and electronic autocollimators. Wedel (Germany). — 2011. [Booklet of MOELLER-WEDEL OPTICAL GmbH. Examples for Applications of collimators, telescopes, visual and electronic autocollimators. Wedel (Germany). 2011]
3. Гукайло М. Я. Автоколлимация. — Москва: Машиностроение, 1963 г. [Gukailo M. YA. Avtokollimatsiya. Moskva: Mashinostroenie, 1963]
4. Королев А. Н., Гарцуев А. И., Полищук Г. С., Трегуб В. П. Цифровой автоколлиматор // Оптический журнал. — 2009. — Т. 76, № 10. — С. 42–47. [Korolev A. N., Gartsuev

A. I., Polishchuk G. S., Tregub V. P. // Opticheskiy zhurnal. 2009. Vol. 76, N 10. P. 42]

5. Описание продукции компании TRIOPTICS "TriAngle". Wedel (Germany). — 2010. [Product description. TRIOPTICS "TriAngle". Wedel (Germany). 2010]

6. Каталог продукции НПК «ДИАГНОСТИКА». — С.-Пб. — 2009. [Katalog produktov NPK «DIAGNOSTIKA». S.-Pb. 2009]

7. Описание продукции TAYLOR HOBSON «Alignment system». — Leicester (United Kingdom), 2009. [Product description. TAYLOR HOBSON «Alignment system». Leicester (United Kingdom), 2009]

8. Описание продукции MOELLER-WEDEL ELCOMAT 3000, ELCOMAT Vario, ELCOMAT HR. — Wedel (Germany). — 2011. [Product description. MOELLER-WEDEL ELCOMAT 3000, ELCOMAT Vario, ELCOMAT HR. Wedel (Germany). 2011]

9. Королев А. Н., Гарцуев А. И. Цифровой двухкоординатный автоколлиматор с разрешением 0,001 угловой секунды // Измерительная техника. — 2004. — № 12. — С. 29–32. [Korolev A. N., Gartsuev A. I. // Izmeritel'naya tekhnika. 2004. N 12. P. 29]

10. Королев А. Н., Гарцуев А. И. Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС матрице // Измерительная техника. — 2004. — № 5. — С. 20–22. [Korolev A. N., Gartsuev A. I. // Izmeritel'naya tekhnika. 2004. N 5. P. 20]

11. Проспект компании DAVIDSON OPTRONICS Principles of Autocollimation and applications. DAVIDSON OPTRONICS: West Covina. — USA, 2011. [Booklet of DAVIDSON OPTRONICS Principles of Autocollimation and applications. DAVIDSON OPTRONICS: West Covina. USA, 2011]

12. Описание продукции LDS Vector Digital autocollimator. Newport: Irvine. — USA, 2010. [Product description. LDS Vector Digital autocollimator. Newport: Irvine. USA, 2010]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 17.02 2012 г.*

Fesenko A.V. Borovitskii V.N. **Visual and optoelectronic autocollimator.**

Keywords: autocollimators, optical-electronic systems multielement photodetectors.

The article presents advantages of optical-electronic autocollimator to the visual ones. The possibility is shown to upgrade existing visual systems by replacing the autocollimating eyepieces by the units containing multielement detectors and connecting them to the computer. The brief characteristics of autocollimating eyepieces and modern optoelectronic autocollimators are given.

Ukraine, Kiev, NTU "KPI".

Фесенко А. В., Боровицкий В. М. **Візуальні та оптико-електронні автоколіматори.**

Ключові слова: автоколіматор, оптико-електронні системи, багатоелементні фотоприймачі.

Показано переваги оптико-електронних автоколіматорів перед візуальними. Розглянуто можливість модернізації існуючих візуальних систем шляхом заміни автоколімаційних окулярів на блоки з багатоелементними приймачами та підключення їх до комп'ютеру. Наведено стислі характеристики автоколімаційних окулярів та сучасних оптико-електронних автоколіматорів

Україна, м. Київ, НТУУ «КПІ».