
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.786
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-563-570

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ АВТОКОЛЛИМАТОР ДЛЯ ДВУХКООРДИНАТНЫХ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

И. А. КОНЯХИН, А. А. МОИСЕЕВА, ВАН ФОНГ ХОАНГ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: igor@grv.ifmo.ru*

Рассматривается задача увеличения рабочей дистанции оптико-электронного автоколлиматора при определении углового положения объектов. Предлагается использовать отражатель в виде четырехугольной пирамиды. Синтезирован алгоритм измерения для автоколлиматора с предлагаемым отражателем. Рассмотрены отражательные свойства пирамидальных систем зеркал. Выполнено сравнение таких зеркальных систем и предложенного пирамидального отражателя.

Ключевые слова: автоколлимационные измерения, контроль точности сопряжения, контроль деформаций, определение трех углов поворота объекта, пирамидальный отражатель

Введение. Высокоточные измерения углов являются типовой операцией в приборостроении [1—4]. При этом широко используется автоколлимационный метод, позволяющий выполнять бесконтактные измерения. В качестве конкретных примеров применения автоколлимации можно привести:

- 1) измерение угловых перемещений частей и блоков крупногабаритных сооружений с целью контроля точности их сопряжения и обеспечения неизменности взаимного расположения [5, 6];
- 2) контроль в реальном масштабе времени деформаций и прогибов нагруженных элементов промышленных и транспортных сооружений [7];
- 3) установка и юстировка оптических компонентов приборов по автоколлимационным точкам [8].

Для решения перечисленных задач эффективно использовать двухкоординатные оптико-электронные автоколлиматоры, широко представленные на рынке контрольно-измерительной техники, например, приборы фирм Оптротех (Россия), Taylor Hobson (США), Möller-Wedel и Trioptics (Германия) [9—12]. Серийные модели имеют высокую точность (погрешность измерения не превышает единиц угловых секунд), однако рабочая дистанция не превышает 3—5 метров, что затрудняет их использование при решении указанных метрологических задач.

Структура оптико-электронной автоколлимационной системы. Оптико-электронная автоколлимационная система включает в себя автоколлиматор, который установлен на неподвижном основании, и отражательный элемент, размещенный на контролируемом объекте (рис. 1). Автоколлиматор содержит канал формирования излучаемого пучка и приемный канал, измеряющий угловое положение отраженного пучка.

Неподвижная система координат XYZ связана с самим автоколлиматором, ось OZ совпадает с его оптической осью, проходящей через заднюю узловую точку объектива и центр анализатора приемного канала — ПЗС или КМОП матрицы [13]. Плоскость XOY параллельна плоскости матрицы, а оси OX и OY — ее строкам и столбцам.

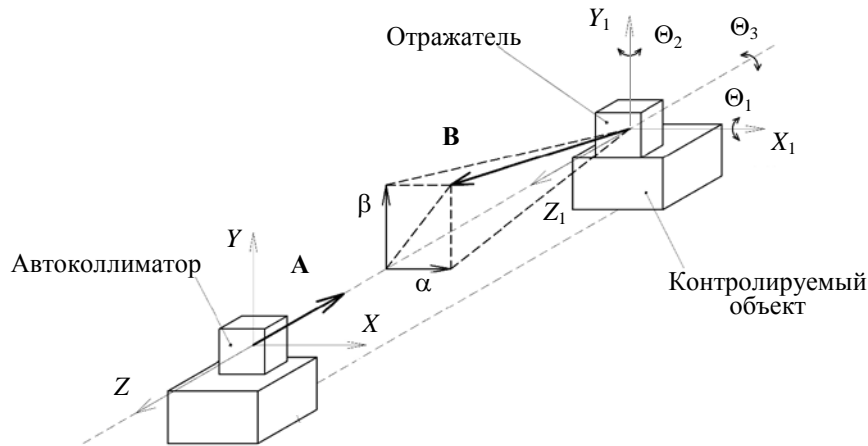


Рис. 1

Подвижная система координат $X_1Y_1Z_1$ связана с отражателем, который размещен на контролируемом объекте. При исходном положении объекта оси системы координат $X_1Y_1Z_1$ параллельны осям системы координат XYZ .

Угловое перемещение объекта в пространстве определяется тремя эквивалентными поворотами Θ_1 , Θ_2 и Θ_3 вокруг осей OX_1 , OY_1 и OZ_1 соответственно (коллимационные углы Θ_1 и Θ_2 ; Θ_3 — угол скручивания).

При повороте объекта отраженные пучки отклоняются от первоначального направления, что изменяет положение изображения на фотоприемной матрице приемного канала. Угловые координаты Θ_1 , Θ_2 отражателя и соответственно скрепленного с ним объекта определяются в результате микропроцессорной обработки видеок кадров, полученных с матрицы.

Анализ действия отражателя. В серийных автоколлиматорах используется отражатель в виде плоского зеркала, которое крепится на контролируемом объекте. При повороте зеркала на углы Θ_1 и Θ_2 относительно коллимационных осей отраженный пучок вернется в объектив автоколлиматора с отклонением пучка от оптической оси объектива на полный угол $2\sqrt{\Theta_1^2 + \Theta_2^2}$.

Рабочая дистанция серийного автоколлиматора с плоским зеркалом не превышает 5 м. Одна из причин этого — значительное смещение отраженного пучка в плоскости апертуры объектива при углах поворота относительно двух коллимационных осей.

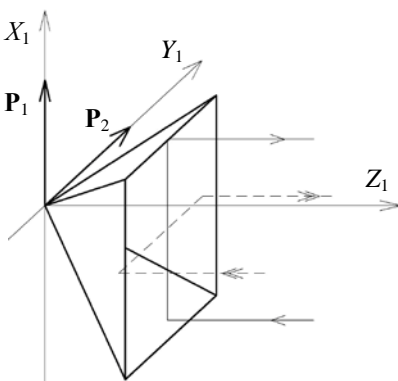


Рис. 2

В настоящей работе рассматривается отражатель, представляющий собой стеклянную четырехугольную пирамиду, позволяющую увеличить рабочую дистанцию (рис. 2). Каждая противоположная пара граней такого отражателя эквивалентна призме БР-180, поэтому параллельный пучок лучей, падающих на преломляющую грань, при отражении разделяется на два пучка, отраженных соответствующей эквивалентной призмой БР-180.

При повороте пирамидального отражателя на углы Θ_1 и Θ_2 каждый отраженный пучок в плоскости апертуры объектива будет перемещаться только в плоскости, содержащей оптическую ось объектива и ребро одной из эквивалентных призм. В результате при двухкоординатных измерениях угол откло-

нения рабочих пучков от оптической оси также равен $2\Theta_1$ (или $2\Theta_2$). Следовательно, диаметр объектива, необходимый для приема этих двух пучков, в $\sqrt{2}$ раз меньше (рис. 3), чем при приеме пучка, отраженного от плоского зеркала (при равных диапазонах измерения углов Θ_1 и Θ_2). Это позволяет соответственно в $\sqrt{2}$ раз увеличить рабочую дистанцию автоколлиматора простой заменой отражающего контрольного элемента и использованием программного обеспечения, реализующего требуемый алгоритм обработки изображения.

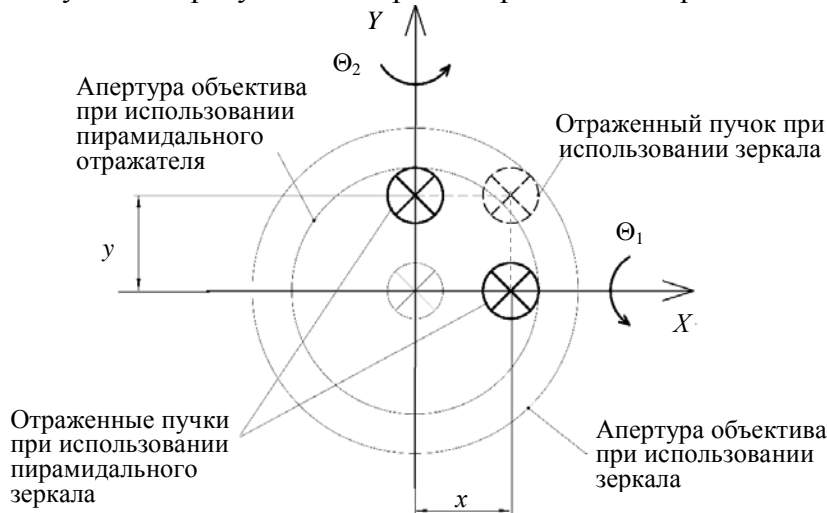


Рис. 3

Матрицы отражения четырехугольного пирамидального отражателя. Орт **V** отраженного пучка (см. рис. 1) после поворота отражателя рассчитывается по формуле [1]:

$$\mathbf{V} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M}_d \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \mathbf{A}, \tag{1}$$

где **A** — орт падающего на отражатель пучка; **M_d** — матрица отражения, связанная с отражателем в системе координат $X_1Y_1Z_1$ [14]; **M_r** и **M_r⁻¹** — матрицы прямого и обратного операторов, определяющих соответственно прямой и обратный переходы между системами координат XYZ и $X_1Y_1Z_1$.

Вид матрицы **M_r** определяется формулой (14.10-26) из [15] при замене $\Theta_1 = \nu$, $\Theta_2 = \psi$, $\Theta_3 = \phi$.

Действие выбранного отражателя эквивалентно действию двух призм БР-180 с взаимноперпендикулярными ребрами двугранных углов между отражающими гранями.

Для призмы БР-180 с ортом ребра $\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ матрица действия определяется при подста-

новке координат орта в выражение (10а) общего вида из [16]:

$$\mathbf{M}_{d1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Для призмы БР-180 с ортом $\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ матрица действия равна:

$$\mathbf{M}_{d2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

При повороте объекта, с которым связан отражатель, на углы Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 координаты ортов $\mathbf{V}_{1,2}$ двух отраженных пучков по осям OX , OY определяются из выражения (1):

$$B_{x1,2} = \cos \Theta_1 \sin 2\Theta_2 \begin{cases} \sin(\Theta_3)^2 + \cos \Theta_2 \sin \Theta_1 \sin 2\Theta_3, \\ \cos(\Theta_3)^2 - \cos \Theta_2 \sin \Theta_1 \sin 2\Theta_3, \end{cases} \quad (4)$$

$$B_{y1,2} = -\sin 2\Theta_1 \begin{cases} \left[\cos(\Theta_2)^2 \sin(\Theta_3)^2 + \cos 2\Theta_3 \right] - \sin \Theta_2 \sin 2\Theta_3 \cos 2\Theta_1, \\ \left[\frac{\cos(\Theta_2)^2 - \sin(\Theta_2)^2 \cos 2\Theta_3 - \cos 2\Theta_3}{2} \right] + \sin \Theta_2 \sin 2\Theta_3 \cos 2\Theta_1, \end{cases} \quad (5)$$

где цифра в индексе орта определяет номер отраженного пучка.

Алгоритмы измерения углов поворота объекта. Автоколлимационные изображения марки, сформированные двумя отраженными пучками в плоскости фотоприемной матрицы приемного канала автоколлиматора, смещаются на величины x_1 , y_1 и x_2 , y_2 по осям OX и OY :

$$x_{1,2} = f \operatorname{tg}(\alpha_{1,2}), \quad y_{1,2} = f \operatorname{tg}(\beta_{1,2}), \quad (6)$$

где f — фокусное расстояние объектива автоколлиматора, $\alpha_{1,2}$ и $\beta_{1,2}$ — углы между проекциями ортов $\mathbf{V}_{1,2}$ в координатных плоскостях YOZ , XOZ и оптической осью объектива. Углы α и β (см. рис. 1) фактически являются долготой и широтой орта отраженного пучка в полярной системе координат (ось OZ , параллельная оптической оси — полярная). Координаты ортов отраженных пучков в системе координат XYZ связаны с долготой и широтой известными соотношениями:

$$[B_{x1,2} \ B_{y1,2} \ B_{z1,2}]^T = [\cos \beta_{1,2} \sin \alpha_{1,2} \ \sin \beta_{1,2} \ \cos \beta_{1,2} \cos \alpha_{1,2}]^T. \quad (7)$$

Выражения (4), (5) и (7) позволяют сформировать систему из четырех нелинейных уравнений (соотношения для $B_{z1,2}$ не используются). Эта система включает две пары уравнений, соответствующих ортам двух пучков, причем уравнения, образующие каждую пару, являются зависимыми.

Измерение углов включает два основных этапа.

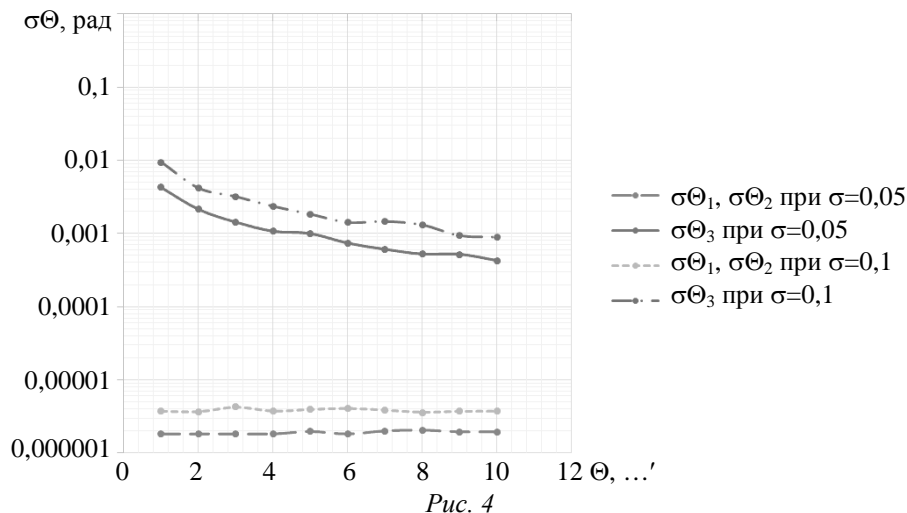
1. В результате обработки видеокadra, полученного с матричного анализатора, определяются величины $x_{1,2}$ и $y_{1,2}$ смещений изображений, затем по выражению (6) вычисляются углы $\alpha_{1,2}$ и $\beta_{1,2}$ между проекциями ортов отраженных пучков и оптической осью объектива.

2. В результате итерационного решения системы из двух пар нелинейных уравнений определяются три угла поворота объекта: Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 .

Алгоритм был реализован в технологии MathCAD15 для диапазона задаваемых углов $\Theta_{\max} = \pm 1^\circ$ (при $f = 150$ мм). Тестовые расчеты показали устойчивость и сходимость итерационного алгоритма при любых значениях углов из указанного диапазона, за исключением варианта $\Theta_1 = \Theta_2 = 0$, при котором полученное значение Θ_3 также было равно нулю вне зависимости от исходной величины.

Формально из рассмотренного алгоритма следует возможность измерения наряду с коллимационными углами угла скручивания Θ_3 . Для практической проверки возможности трехкоординатных измерений была создана имитационная компьютерная модель приемного канала, использующая рассмотренный алгоритм. Ошибки $dx_{1,2}$ и $dy_{1,2}$ определения смещения изображений задавались с помощью генератора значений нормальной случайной величины с нулевым математическим ожиданием и средним квадратическим значением, равным задаваемой погрешности измерения σ , выраженной в долях от линейного размера пиксела фотоприемной матрицы (рассматривался квадратный пиксел размером 12×12 мкм). Выходные параметры модели — оценки σ_{Θ_1} , σ_{Θ_2} , σ_{Θ_3} среднеквадратического значения погрешности измерения угловых координат. На рис. 4 приведены зависимости σ_{Θ_1} , σ_{Θ_2} , σ_{Θ_3} от величины коллима-

ционных углов (полагалось $\Theta_1 = \Theta_2$) при неизменной величине $\Theta_3 = 15'$ для $\sigma = 0,05$ и $0,1$ (практически реализуемая точность при использовании алгоритма „взвешенного суммирования“ [17]).



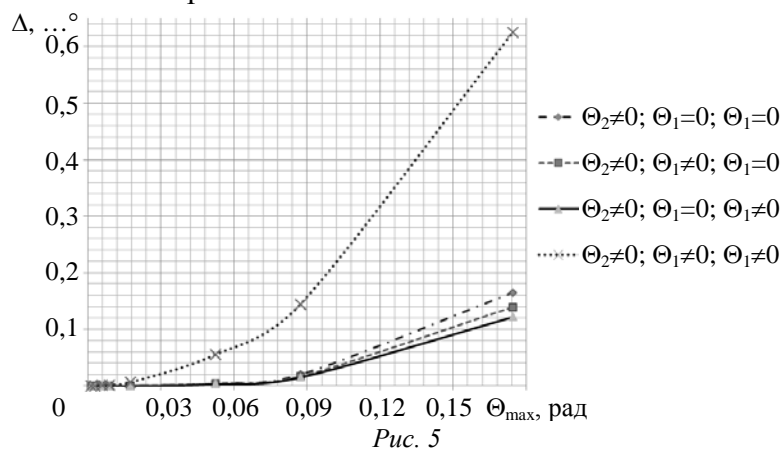
Моделирование показало, что погрешность измерения угла скручивания Θ_3 ($\sigma\Theta_3$ не менее единиц угловых минут) значительно превышает погрешность измерения коллимационных углов ($\sigma\Theta_1, \sigma\Theta_2$ порядка угловой секунды) и экспоненциально возрастает с уменьшением отношения Θ_3/Θ_1 (и/или Θ_3/Θ_2) до десятков угловых минут. Указанное обстоятельство позволяет использовать рассматриваемый отражатель для измерения угла скручивания при решении узкого круга задач, например, при динамических измерениях в следящем режиме, когда в каждый момент времени отражатель повернут относительно коллимационных осей [18].

Использование рассмотренного алгоритма требует включения в состав автоколлиматора микропроцессора. При малых измеряемых углах может использоваться приближенный алгоритм вида:

$$\Theta_2 = x_2/(2f), \quad \Theta_1 = y_1/(2f). \tag{8}$$

В этом случае алгоритм обработки изображения может быть реализован простым электронным блоком на основе логических микросхем среднего уровня интеграции (см. раздел 5.2 в [19]).

При использовании алгоритма (8) возникающая методическая погрешность Δ определяется диапазоном измеряемых коллимационных углов Θ_1, Θ_2 и составляющей, определяемой углом скручивания Θ (рис. 5). В частности, для диапазона измерения $\Theta_{\max} = \pm 15'$, типичного для серийных автоколлиматоров, в отсутствие угла скручивания $\Delta \approx 1,2''$, эта величина допустима при многих практических измерениях.



Варианты конфигурации отражателя. Призмы БР-180, образующие пирамиду, относятся к классу отражающих систем — зеркальных двугранных углов с линейным углом π/s , (при $s=2$; s — четное число) [20].

Рассмотрим отражатель в виде четырехугольной пирамиды, эквивалентной двум двугранным углам с взаимно-перпендикулярными ребрами и линейными углами $\pi/4$ (π/s при $s=4$). Матрицы отражения такой структуры также описываются выражениями (2) и (3), однако пучок при отражении от каждого зеркального двугранного угла претерпевает не два, а четыре отражения (рис. 6, а). Вследствие того что точки второго и третьего отражений расположены значительно ближе к ребру, по сравнению с точками первого и четвертого, часть пучка при отражении от одного двугранного зеркала пирамиды срезается зеркалами другого, ортогонально расположенного. В результате апертура отражателя принимает характерный крестообразный вид (рис. 6, б), что приводит к уменьшению на 60 % эффективной отражающей поверхности по сравнению с пирамидальным отражателем на основе призм БР-180.

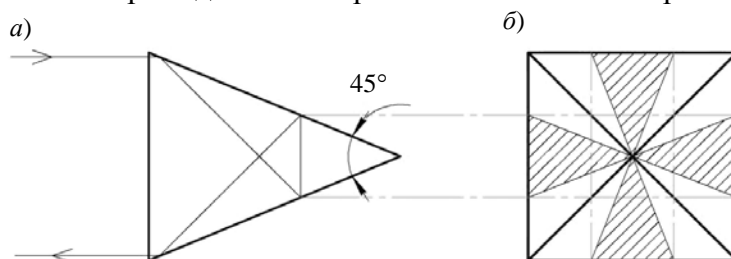


Рис. 6

Заключение. При использовании отражателя в виде четырехугольной стеклянной пирамиды с прямыми двугранными углами (углы π/s , $s=2$) при вершине рабочая дистанция автоколлиматора может быть увеличена в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с вариантом отражателя — плоского зеркала. Найденный алгоритм измерения принципиально позволяет выполнять трехкоординатные угловые измерения, однако практически измерение угла скручивания выполняется только в случае наличия коллимационных углов поворота. При отсутствии поворотов на угол скручивания может использоваться упрощенный алгоритм измерения коллимационных углов. Возникающая методическая погрешность измерения пренебрежимо мала при диапазонах измерения, типичных для серийных автоколлиматоров. Использование в качестве отражателя стеклянных четырехугольных пирамид с двугранными углами при вершине π/s в случае $s > 2$ (s — четное) нецелесообразно по критерию энергетической эффективности.

Работа поддержана грантом 074-U01 Правительства Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. С. 197.
2. Аникст Д. А., Костантинович К. М., Меськин И. В., Панков Э. Д. Высокоточные угловые измерения. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
3. Апенко М. И. и др. Оптические приборы в машиностроении: Справочник. М.: Машиностроение, 1974.
4. Arakantsev K. G., Konyakhin I. A., and Timofeev A. N. Inner-base optoelectronic system for the control of linear displacements // Key Engineering Materials. 2010. N 437. P. 237—241.
5. Konyakhin I. A., Timofeev A. N., Usik A. A., and Zhukov D. V. Optic-electronic systems for measuring the angle deformations and line shifts of the reflecting elements at the rotateable radio-telescope // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8082. P. 80823R.
6. Автоколлимационная установка для проверки нивелиров и теодолитов АУПНТ // НПП Точприбор [Электронный ресурс]: <<http://npp-tp.ru/products/kip/geometricheskie-si/metrologicheskoe-oborudovanie/avtokollimacionnaya-ustanovka-dlya-poverki-nivelirov-i-teodolitov-aupnt.html>>.

7. Дефекты и способы контроля направляющих // Оборудование и Ремонт [Электронный ресурс]: <<http://www.webrarium.ru/korpus-remont-napravlayshih.html>>.
8. *Ivanov A. V., and Ostrun A. B.* Improved universal method for a size calculation of centered optical systems // J. of Optical Technology. 2015. Vol. 79. P. 285—288.
9. TriAngle® electronic autocollimator // TRIOPTICS [Электронный ресурс]: <<http://www.trioptics.com/triangle/description.php>>.
10. Цифровой двухкоординатный автоколлиматор с разрешением 0.001 угловой секунды // Опротех: оптические цифровые измерительные системы [Электронный ресурс]: <<http://www.optrotech.ru/issl3.php>>.
11. Elektronische autokollimatoren // Möller-WedelOpticalInternational [Электронный ресурс]: <<http://www.moellerwedel-optical.com/produkte/elektronische-autokollimatoren>>.
12. Автоколлиматор Ultra // TaylorHobsonLtd [Электронный ресурс]: <<http://taylor-hobson.ru/katalog-produktcii/avtokollimator-ultra.html>>.
13. *Королев А. Н.* и др. Цифровой автоколлиматор // Оптический журнал. 2009. Т. 76, № 10. С. 42—47.
14. *Vanderwerf D. F.* Applied prismatic and reflective optics // SPIE. Bellingham, Washington, 2010. P. 303.
15. *Korn G. A., Korn Th. M.* Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review. NY: Dover Publications, 2000. 1152 p.
16. *Погарев Г. В., Киселев Н. Г.* Оптические юстировочные задачи: Справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 260 с.
17. *Жуков Д. В., Коняхин И. А., Усик А. А.* Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // Оптический журнал. 2009. Т. 76, № 1. С. 43—45.
18. *Городецкий А. Е., Дорошенко М. С., Тарасова И. Л., Коняхин И. А.* Анализ погрешностей системы управления автоколлиматора с активной компенсацией // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 5. С. 76—81.
19. *Коняхин И. А., Панков Э. Д.* Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры: Справочник. М.: Недра, 1991. 224 с.
20. *Процко С. В., Хапалюк А. П.* Отражатели в форме зеркально-симметричных углов // Изв. вузов. Приборостроение. 1984. Т. 27, № 12. С. 53—57.

Сведения об авторах

- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: igor@grv.ifmo.ru
- Анастасия Алексеевна Моисеева** — студент; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: nastiakor@gmail.com
- Ван Фонг Хоанг** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: vanphongkqh@yahoo.com

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов
и систем

Поступила в редакцию
17.02.16 г.

Ссылка для цитирования: *Коняхин И. А., Моисеева А. А., Хоанг Ван Фонг.* Оптико-электронный автоколлиматор для двухкоординатных угловых измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 7. С. 563—570.

OPTICAL-ELECTRONIC AUTOCOLLIMATOR FOR TWO-COORDINATE ANGULAR MEASUREMENTS

I. A. Konyakhin, A. A. Moiseeva, Van Phong Hoang

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: igor@grv.ifmo.ru*

The problem of increasing the working distance of optical-electronic autocollimator when applied to determination of an object angular position is considered. It is proposed to use a quadrangular pyramidal reflector to improve the autocollimator features. An algorithm of measurement using an autocollimator with the proposed reflector is developed. Reflective properties of pyramidal mirror systems are analyzed, comparison of such systems with the proposed pyramidal reflector is presented.

Keywords: autocollimation measurements, control of precision docking, control of deformations, determination of object rotation angles, pyramidal reflector

Data on authors

- Igor A. Konyakhin** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: igor@grv.ifmo.ru
- Anastasia A. Moiseeva** — Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: nastiakor@gmail.com
- Van Phong Hoang** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: vanphongkqh@yahoo.com

For citation: *Konyakhin I. A., Moiseeva A. A., Hoang Van Phong.* Optical-electronic autocollimator for two-coordinate angular measurements // *Izv. vuzov. Priborostroenie.* 2016. Vol. 59, N 7. P. 563—570 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-563-570