

СИНТЕЗ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ УВЕЛИЧЕННОЙ РАБОЧЕЙ ДИСТАНЦИИ

Ли Женьпу, И. А. Коняхин

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Представлен анализ соотношений параметров отражателя в виде зеркального триэдра, предназначенного для автоколлимационных измерений углов поворота объекта относительно коллимационных осей. Использование отражателя позволяет увеличить рабочую дистанцию автоколлимационных измерений по сравнению с вариантом использования плоского зеркала. Рассмотрена специальная конфигурация триэдра с зеркальной гранью в виде двух отдельных секций, использование которой позволяет более чем в три раза повысить эффективную площадь отражения поверхности по сравнению с известными триэдрическими отражателями.

Ключевые слова: автоколлимационный метод измерения деформаций, измерение коллимационных углов, отражатель в виде зеркального триэдра, увеличенная рабочая дистанция, эффективная площадь отражения

Автоколлиматоры различных типов широко используются для угловых измерений, поскольку могут работать в бесконтактном режиме, при этом на контролируемом объекте располагается пассивный зеркальный или призмный отражатель, а собственно автоколлиматор с излучающим и приемным каналами закреплен на жесткой базе вне зоны измерения [1]. Рабочая дистанция „автоколлиматор—отражатель“ не превышает нескольких метров для диапазона измерения от 0 до 30' [2—4]. Вместе с тем для мониторинга угловых деформаций протяженных объектов промышленности и энергетики при решении задачи техносферной безопасности требуется рабочая дистанция не менее 10...20 м [5].

Рабочая дистанция L автоколлиматора определяется геометрическим условием попадания оси отраженного пучка в плоскость апертуры объектива приемного канала автоколлиматора:

$$L \operatorname{tg}(K\Theta_{\max}) = D/2, \quad (1)$$

где D — диаметр апертуры объектива, Θ_{\max} — диапазон измерения угла поворота отражателя относительно оси, перпендикулярной оптической оси объектива автоколлиматора (коллимационный угол), K — коэффициент преобразования отражателя.

Для отражателя — плоского зеркала с $K = 2$ — и автоколлиматора с типовыми параметрами $D = 60$ мм, $\Theta_{\max} = 10''$ рабочая дистанция L в соответствии с выражением (1) не превышает 5,2 м.

Для увеличения рабочей дистанции следует использовать отражатель с меньшей по сравнению с плоским зеркалом величиной коэффициента K .

Известен отражатель для трехкоординатных измерений (два коллимационных угла и угол скручивания как поворот относительно оптической оси объектива) на основе зеркального триэдра, углы между гранями 1, 2, 3 которого отличны от прямого угла (см. рисунок; здесь штриховая линия — исходная граница грани 1): $\angle 1_2 = 90^\circ - \delta_1$, $\angle 2_3 = 90^\circ - \delta_2$, $\angle 3_1 = 90^\circ - \delta_3$, где $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ не превышают величины $\delta = 1,5^\circ$ (0,026 рад) [6]. Коэффициент преобразования, приблизительно равный 4δ , имеет величину $K \approx 0,1$. Такой отражатель формирует три пары отраженных пучков, которые различаются по последовательности отраже-

ний частей падающего пучка от граней триэдра. Однако для измерения именно коллимационных углов используется только одна пара отраженных пучков, содержащих $k_1=1/3$ потока излучения падающего пучка. Также ось симметрии триэдра составляет угол $9,8^\circ$ с оптической осью автоколлиматора, что в соответствии с апертурной характеристикой отражателя на $k_2 = 30\%$ уменьшает отраженный поток. В результате относительная эффективная площадь отражения при измерении коллимационных углов составит $k_1(1 - k_2) = 0,23$ [7].

Рассмотрим оптимизированный по энергетическому критерию отражатель в виде аналогичного зеркального триэдра для измерения только двух коллимационных углов как наиболее типичных при контроле деформаций элементов протяженных конструкций.

Наибольшая чувствительность отражателя к поворотам относительно коллимационных осей OX , OY достигается при расположении вектора \mathbf{U} его основного неизменного направления параллельно оптической оси объектива — оси OZ [6]. Вектор \mathbf{U} в этом случае определяется выражением

$$\mathbf{U} = [U_x \quad U_y \quad U_z]^T = [0 \quad 0 \quad U]^T, \quad (2)$$

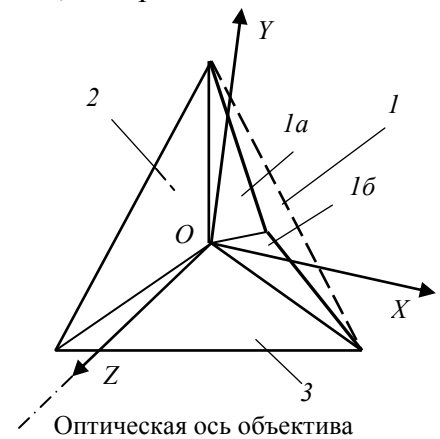
где U_x , U_y , U_z — координаты вектора \mathbf{U} , U — модуль вектора.

Для плоского зеркала вектору \mathbf{U} соответствует орт нормали к его поверхности.

Координаты вектора \mathbf{U} для трех пар отраженных пучков, соответствующих различным последовательностям отражения от граней триэдра, определяются по формулам (3.70), (3.71), (3.72) из работы [6]. Приравняв координаты U_x , U_y нулю в соответствии с выражением (2), получим соотношения, определяющие требуемые величины δ_1 и δ_3 при заданном значении δ_2 , принимаемом за базовое (см. таблицу). В графах 5, 7 указаны упрощенные зависимости для $\delta \leq 1,5^\circ$ с погрешностью приближения не более $0,08\%$ для первой и второй пар пучков и до 5% для третьей пары.

Последовательность отражения	δ_2		δ_1		δ_3	
	Точное выражение	Упрощенное выражение	Точное выражение	Упрощенное выражение	Точное выражение	Упрощенное выражение
1	2	3	4	5	6	7
1-я пара пучков: 2-1-3, 3-1-2	δ_2	δ	$-\arctg(\sin \delta_2)$	$-\delta$	$-\arctg(\sin(\arctg(\sin \delta_2)))$	$-\delta$
2-я пара пучков: 1-2-3, 3-2-1	δ_2	δ	$-\arctg(\sin \delta_2)$	δ	$-\arctg(\sin(\arctg(\sin \delta_2)))$	$-\delta$
3-я пара пучков: 1-3-2, 2-3-1	δ_2	δ	$-\arctg\left(\frac{\sin \delta_2}{\cos(2\delta_2)} \times \frac{1 + \operatorname{tg}(2\delta_2)}{1 + \operatorname{tg}(2\delta_2)^2}\right)$	$-\delta$	$\arctg\left(\frac{\sin \delta_2 \cdot \cos \delta_1}{\cos(2\delta_2)} + \operatorname{tg}(2\delta_2) \cdot \sin \delta_1\right)$	δ

Анализ таблицы показывает, что для первой и третьей пар отраженных пучков из двух величин δ_1 и δ_3 , определяющих положение грани I относительно двугранного угла $\angle 2_3$, знаки δ_1 одинаковы, а знаки δ_3 противоположны. Так как для первой пары пучков грань I является второй по последовательности отражения, а для третьей пары — первой (или третьей), то для этих пар пучков отражение происходит от различных половин грани I [8]. Это



позволяет выполнить грань I в виде двух частей Ia и Ib (см. рисунок), для одной из которых (Ia) соотношения между величинами δ_1 и δ_3 реализуется для первой пары отраженных пучков, а для второй (Ib) — для третьей пары. В результате для измерения коллимационных углов могут использоваться две пары отраженных пучков, содержащих $2/3$ потока излучения падающего пучка.

Величина коэффициента преобразования K такого триэдрического отражателя определяется по формулам (3.40), (3.56) и (3.68) из работы [6]:

$$K = \sin \omega = 2U \cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2 \cdot \cos \delta_3, \quad (3)$$

где ω — угол поворота пучка относительно основного неизменного направления, задаваемого вектором U ; в частности, для $\delta = 1,5^\circ$ величина $K = 0,091$.

Таким образом, найденные соотношения параметров δ_1 , δ_2 , δ_3 позволяют синтезировать отражатель для измерения коллимационных углов с относительной эффективной площадью отражения не менее 0,66. Коэффициент преобразования такого отражателя имеет значительно меньшую величину по сравнению с коэффициентом преобразования плоского зеркала, что позволяет увеличить рабочую дистанцию автоколлимационных измерений.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации, грант 074-U01.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст, К. М. Костантинович, И. В. Меськин, Э. Д. Панков; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
2. TriAngle® Electronic Autocollimator [Электронный ресурс]: <<http://www.trioptics.com/triangle/description.php>> (дата обращения 24.02.2017).
3. Автоколлиматор Ultra [Электронный ресурс]: <<http://taylor-hobson.ru/katalog-produkcii/avtokollimator-ultra.html>> (дата обращения 24.12.2015).
4. Королев А. Н. и др. Цифровой автоколлиматор // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 10. С. 42—47.
5. Konyakhin I. A., Van Phong Hoang, Artemenko Yu. et al. Optic-electronic system for measuring the three-dimensional angular deformation of the pipe sections at large constructions // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9525. P. 952540-1-952540-8.
6. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. 197 с.
7. Vanderwerf D. F. Applied Prismatic and Reflective Optics. Bellingham, WA: SPIE, 2010.
8. Ритынь Н. Э. Оптические свойства уголкового отражателя // Оптико-механ. пром-сть. 1967. № 4. С. 1—4.

Сведения об авторах

- Ли Женьпу** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: lirenpu@hotmail.com
- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
02.07.17 г.

Ссылка для цитирования: Ли Женьпу, Коняхин И. А. Синтез отражателей для автоколлимационных измерений при увеличенной рабочей дистанции // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 11. С. 1060—1063.

**SYNTHESIS OF REFLECTORS FOR AUTOCOLLIMATION MEASUREMENTS
WITH INCREASED OPERATIONAL DISTANCE****Li Renpu, I. A. Konyakhin***ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: igor@grv.ifmo.ru*

Relations between parameters of the trihedron-shaped reflector for autocollimation-based measurements of rotation angle are analyzed. In comparison to flat mirror, the use of the reflector allows to increase the operational distance of autocollimation measurements. Special configuration of the trihedron with reflective edge in the form of two separated sections is considered. It is shown that application of such configuration makes the effective reflection surface more than three times as large as for existing trihedron reflectors.

Keywords: autocollimation method of deformation measurement, collimation angle measurements, trihedron reflector, increased working distance, effective reflection surface

Data on authors

- Li Renpu** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: lirenpu@hotmail.com
- Igor A. Konyakhin** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: igor@grv.ifmo.ru

For citation: Li Renpu, Konyakhin I. A. Synthesis of reflectors for autocollimation measurements with increased operational distance. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 11. P. 1060—1063 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1060-1063