

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕХКООРДИНАТНОЙ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

И. А. Коняхин, Хоанг Ван Фонг, Хоанг Ань Фьонг

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия*

*E-mail: igor@grv.ifmo.ru*

Представлены результаты экспериментального исследования двух алгоритмов автоколлимационных измерений пространственного поворота объекта, основанных на матричной и кватернионной математических моделях. Эксперименты выполнялись на макете трехкоординатной автоколлимационной системы, использующей отражатель в виде стеклянного тетраэдра, двугранные углы между отражающими гранями которого имеют малые отклонения от прямого. Показано преимущество кватернионного алгоритма по критерию уменьшения погрешности измерения.

**Ключевые слова:** экспериментальное исследование, трехкоординатный автоколлиматор, алгоритм на основе кватернионной модели, параметры пространственного поворота, погрешность измерения

**Введение.** В настоящее время определение углового положения объектов в пространстве является частью метрологического обеспечения науки, производства, строительной индустрии, например, при решении следующих задач [1—3]:

— мониторинговые измерения угловых деформаций нагруженных частей сооружений, реализуемые с целью контроля их состояния и повышения безопасности функционирования;

— определение углового пространственного положения причаливаемого объекта при стыковке в воздухе или космосе;

— уточнение пространственного положения оси протяженных объектов при наличии преобладающего вращательного движения или деформаций скручивания, например, углового положения осей азимутального и зенитного поворотов зеркал телескопов и радиотелескопов, валов, труб газо- и нефтепроводов;

— контроль точности установок блоков оборудования и агрегатов при их монтаже и эксплуатации.

Для определения углового пространственного положения объекта эффективны оптико-электронные автоколлимационные углоизмерительные системы [4]. Повороты объекта определяются как изменение положения осей системы координат  $X_1Y_1Z_1$ , связанной с отражателем, относительно осей неподвижной приборной системы координат  $XYZ$  автоколлиматора [5].

При решении указанных метрологических задач для получения информации об угловом положении контролируемого объекта, а также формирования управляющих (корректирующих или компенсирующих) воздействий необходимо измерение трех параметров его пространственного поворота, определяемого положением оси поворота, которое задается азимутальным  $\chi$  и зенитным  $\eta$  углами, а также углом  $\varphi$  поворота относительно этой оси (рис. 1).

В известных реализациях трехкоординатных автоколлиматоров эквивалентные углы  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  последовательных поворотов системы координат  $X_1Y_1Z_1$  измеряются относительно собственных осей [1—3], причем пересчет этих углов к требуемым величинам  $\chi, \eta, \varphi$  увеличивает погрешность определения параметров пространственного поворота (см. рис. 1). Математически алгоритм измерения трех параметров  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  угловой ориентации базируется на выражении для орта  $\mathbf{B}$  отраженного пучка, записанного в виде матричного произведения [1—3]:

$$\mathbf{B} = \mathbf{M}_r(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \cdot \mathbf{M}_d \cdot \mathbf{M}_r(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3)^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$  — орт падающего на отражатель пучка;  $\mathbf{M}_d$  — матрица действия отражателя автоколлиматора;  $\mathbf{M}_r(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3)$  и  $\mathbf{M}_r(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3)^{-1}$  — матрицы прямого и обратного преобразования координат, описывающие результирующий поворот отражателя из исходного положения в текущее.

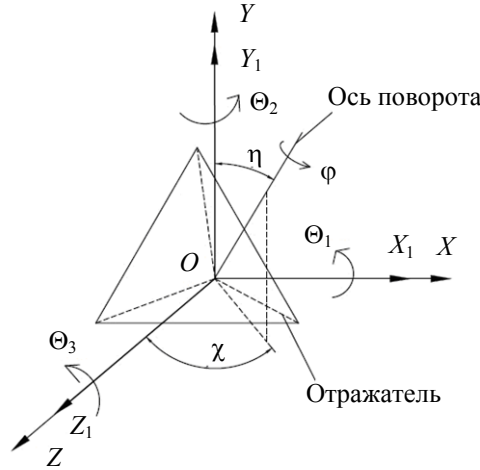


Рис. 1

Однако орт  $\mathbf{B}$  может быть выражен непосредственно через три параметра  $\chi$ ,  $\eta$ ,  $\varphi$  пространственного поворота с помощью алгебры кватернионов [4]:

$$\mathbf{B} = Q_R(\eta, \chi, \varphi) \circ (Q_p \circ Q_r) \circ \bar{Q}_R(\eta, \chi, \varphi) \circ \mathbf{A} \circ Q_R(\eta, \chi, \varphi) \circ (\bar{Q}_r \circ Q_p) \circ \bar{Q}_R(\eta, \chi, \varphi), \quad (2)$$

где „ $\circ$ “ — знак кватернионного умножения;  $Q_p$  — кватернион инверсии;  $Q_r$  — кватернион поворота (при отражении) орта пучка на угол  $\omega$  относительно основного неизменного направления отражателя;  $Q_R(\eta, \chi, \varphi)$  и  $\bar{Q}_R(\eta, \chi, \varphi)$  — кватернионы прямого и обратного (через сопряженный кватернион) переходов между системами координат  $XYZ$  и  $X_1Y_1Z_1$  [6, 7].

После измерения координат орта  $\mathbf{B}$  приемной системой автоколлиматора искомые параметры  $\chi$ ,  $\eta$ ,  $\varphi$  пространственного поворота отражателя определяются в результате пересчета углов  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$ , найденных из уравнения (1), или непосредственно как корни уравнения (2).

Результаты компьютерного моделирования показали сравнительно более высокую эффективность алгоритма на основе кватернионов по критерию минимизации погрешности измерения параметров  $\chi$ ,  $\eta$ ,  $\varphi$  поворота [8].

**Экспериментальный стенд и автоколлимационная система.** Для практического сравнения двух алгоритмов измерения, соответствующих выражениям (1) и (2), в лаборатории кафедры оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО был реализован макет трехкоординатной автоколлимационной системы; стенд для исследований показан на рис. 2, где 1 — двухкоординатный автоколлиматор (ДАК); 2 — дополнительный приемный канал (ДПК); 3 — отражатель, 4 — трехкоординатный поворотный столик; 5 — обрабатывающий компьютер (ПК).

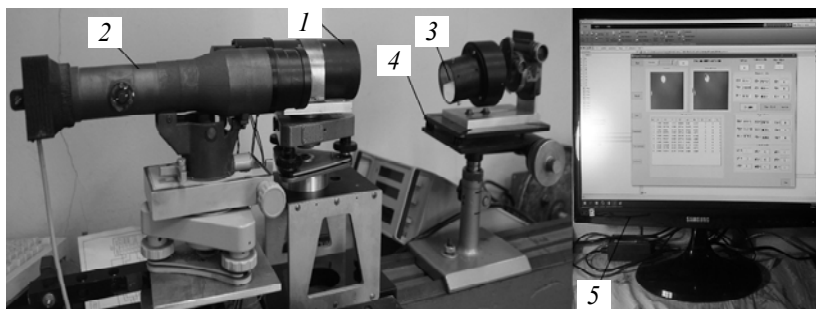


Рис. 2

Двухкоординатный автоколлиматор 1 предназначен для генерации пучка, падающего на отражатель 3, и регистрации отраженных пучков, образующих при выполнении измерений малые углы с оптической осью объектива коллиматора [9, 10]; дополнительный приемный канал 2 используется для регистрации „бокового“ отраженного пучка, ось которого образует при отсутствии поворотов отражателя угол  $3^{\circ}50'$  с осью падающего пучка. Фокусные расстояния объективов ДАК и ДПК соответственно равны 150 и 400 мм; в качестве анализаторов изображения используются ПЗС-матрица ICX259AL (Sony) с размером пиксела  $6,5 \times 6,2$  мкм и КМОП-матрица VEA-535 (ООО „ЭВС“) с размером пиксела  $2,775 \times 2,775$  мкм [11, 12].

Отражатель автоколлиматора выполнен в виде стеклянного тетраэдра, двугранные углы между отражающими гранями которого имеют малые отклонения  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  от прямого. Величины  $\delta_{1,2,3}$  оптимизированы по критерию уменьшения погрешности измерения параметров  $\chi, \eta, \varphi$  пространственного поворота и составляют:  $\delta_1 = 49'22''$ ,  $\delta_2 = -40'$ ,  $\delta_3 = 40'$  [4]. При этом для отражателя, выполненного из стекла К8, коэффициенты передачи по углам  $\Theta_1, \Theta_2$  поворота равны  $K_{1,2} = 0,043$ , по углу  $\Theta_3$  —  $K_3 = 0,067$ . Экспериментально найденное значение пороговой чувствительности трехкоординатной системы по углам  $\Theta_1, \Theta_2$  составляет  $23''$ , по углу  $\Theta_3$  —  $15''$  в диапазоне углов до  $2^{\circ}$ .

**Методика проведения и результаты экспериментов.** Эксперименты выполнялись для сравнения точностных характеристик алгоритмов автоколлимационного измерения, основанных на двух различных теоретических моделях — матричной и кватернионной. В частности, определялись погрешности  $\sigma\chi$  и  $\sigma\eta$  измерения соответственно азимутального и зенитного углов оси поворота, а также погрешность  $\sigma\varphi$  измерения угла поворота относительно этой оси. Для этого по заданным значениям параметров  $\chi_0, \eta_0, \varphi_0$  пространственного поворота рассчитывались соответствующие значения углов  $\Theta_{01}, \Theta_{02}, \Theta_{03}$  последовательных поворотов [7], на которые затем с помощью трехкоординатного поворотного столика 4 разворачивался отражатель 3 (см. рис. 2). Координаты изображений на матричных анализаторах приемных каналов определялись по результатам обработки видеок кадров с помощью компьютера 5. По координатам изображений определялись значения составляющих ортов  $\mathbf{V}_{1,2}$  отраженных пучков, а затем — по алгоритмам (1) и (2) — измеренные значения параметров  $\chi, \eta, \varphi$ . Погрешность их измерения определялась разностью полученных и заданных значений. Для каждого набора значений  $\chi_0, \eta_0, \varphi_0$  измерения  $\chi, \eta, \varphi$  выполнялись по 10 видеок кадрам.

На рис. 3 показаны средние квадратические значения погрешности измерения параметров поворота для 11 наборов значений параметров  $\chi_0, \eta_0, \varphi_0$ , задаваемых с равным шагом в диапазоне  $\eta = [1,0 \dots 1,86]$  рад,  $\chi = [-0,18 \dots 0,18]$  рад,  $\varphi = [-0,002 \dots 0,002]$  рад.

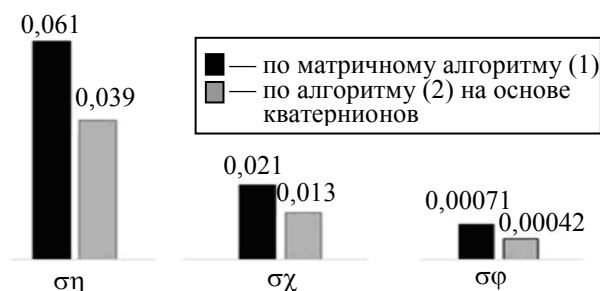


Рис. 3

Как следует из графиков, при использовании алгоритма на основе кватернионов погрешность измерения в 1,5—2 раза меньше по сравнению погрешностью при использовании матричного алгоритма, что соответствует результатам теоретического анализа и компьютерного моделирования [8].

**Заключение.** Результаты экспериментов подтвердили достоверность проектных методик расчета параметров отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров. Также доказано

потенциальное уменьшение погрешности определения параметров  $\chi$ ,  $\eta$ ,  $\phi$  пространственного поворота объекта с помощью алгоритма на основе кватернионного выражения по сравнению с традиционным алгоритмом на основе матричной алгебры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. 197 с.
2. Hoang P. V., Konyakhin I. A. Autocollimation system for measuring angular deformations with reflector designed by quaternionic method // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10329. P. 1032938.
3. Коняхин И. А., Тургалиева Т. В. Трехкоординатный цифровой автоколлиматор // Оптич. журнал. 2013. Т. 80, № 12. С. 74—81.
4. Коняхин И. А., Хоанг В. Ф. Применение кватернионов для расчета параметров отражателя автоколлимационной углоизмерительной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 5. С. 773—779.
5. Сивцов Г. П. Пространственные оптические системы: Монография. Новосибирск: СГГА, 2011. 332 с.
6. Erdogdu M., Ozdemir M. On eigenvalues of split quaternion matrices // Advances in Applied Clifford Algebras. 2013. Т. 23, May. P. 615—623.
7. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
8. Хоанг Ван Фонг, Коняхин И. А. Анализ погрешности измерения параметров поворота объекта методом автоколлимации с помощью компьютерных моделей на основе кватернионов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 12. С. 1157—1160.
9. 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.
10. Hoang V. P., Konyakhin I. A. Autocollimation sensor for measuring the angular deformations with the pyramidal prismatic reflector // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10231. P. 102311.
11. ПЗС- и КМОП-матрицы Sony // Фотоника [Электронный ресурс]: <<http://www.npk-photonica.ru/content/products/ccd-cmos-sensors-sony>>.
12. Бескорпусная цветная мегапиксельная телевизионная камера высокого разрешения. Модели VEA/VEI-535// Компания ООО „ЭВС“ [Электронный ресурс]: <[http://www.evs.ru/d\\_sheet/VEA-VEI-535.pdf](http://www.evs.ru/d_sheet/VEA-VEI-535.pdf)>.

#### 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
- Хоанг Ван Фонг** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: vanphongkqh@yahoo.com
- Хоанг Ань Фьонг** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: hoanglaogia\_2508@mail.ru

Поступила в редакцию  
20.08.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Коняхин И. А., Хоанг Ван Фонг, Хоанг Ань Фьонг. Экспериментальные исследования трехкоординатной автоколлимационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 9. С. 751—755.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THREE-COORDINATE AUTOCOLLIMATION SYSTEM

I. A. Konyakhin, Hoang Van Phong, Hoang Anh Phuong

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Two algorithms of autocollimation measurements of spatial rotation of an object based on matrix and quaternionic theoretical models are studied experimentally. The experiments were performed with a model of three-coordinate autocollimation system using glass tetrahedral reflector with the dihedral angles between the reflecting faces slightly deviating from right angle. The advantage of the quaternionic algorithm is demonstrated using reduction of the measurement error as a criterion.

**Keywords:** experimental research, three-coordinate autocollimator, algorithm based on quaternionic model, parameters of spatial rotation, measurement error

## REFERENCES

1. Dzhabiyev A.N., Konyakhin I.A., Pankov E.D. *Avtokollimatsionnyye ugloizmeritel'nyye sredstva monitoringa deformatsiy* (Autocollimation Angle Measuring Tools for Deformation Monitoring), St. Petersburg, 2000, 197 p. (in Russ.)
2. Hoang P.V., Konyakhin I.A. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10329, pp. 1032938.
3. Konyakhin I.A., Turgaliyeva T.V. *Journal of Optical Technology*, 2013, no. 12(80), pp. 74–81. (in Russ.)
4. Konyakhin I.A., Hoang V.P. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, no. 5(16), pp. 773–779. (in Russ.)
5. Sivtsov G.P. *Prostranstvennyye opticheskiye sistemy* (Spatial Optical Systems), Novosibirsk, 2011, 332 p. (in Russ.)
6. Erdogdu M. and Ozdemir M. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 2013, vol. 23, May, pp. 615–623.
7. Branets V.N., Shmyglevskiy I.P. *Primeneniye kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela* (Application of Quaternions in Problems of Orientation of a Solid Body), Moscow, 1973, 320 p. (in Russ.)
8. Hoang V.P., Konyakhin I.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 12(60), pp. 1157–1160. (in Russ.)
9. Konyakhin I.A., Moiseyeva A.A., Hoang V.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 7(59), pp. 563–570. (in Russ.)
10. Hoang V.P., Konyakhin I.A. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10231, pp. 102311.
11. <http://www.npk-photonica.ru/content/products/ccd-cmos-sensors-sony>. (in Russ.)
12. [http://www.evs.ru/d\\_sheet/VEA-VEI-535.pdf](http://www.evs.ru/d_sheet/VEA-VEI-535.pdf). (in Russ.)

## Data on authors

<b>Igor A. Konyakhin</b>	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: igor@grv.ifmo.ru
<b>Hoang Van Phong</b>	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: vanphongkqh@yahoo.com
<b>Hoang Anh Phuong</b>	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: hoanglaogia_2508@mail.ru

**For citation:** Konyakhin I. A., Hoang Van Phong, Hoang Anh Phuong. Experimental study of three-coordinate autocollimation system. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 9. P. 751–755 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-9-751-755