

Е. В. Романова

АО «НПП Калужский приборостроительный завод «ТАЙФУН»», Калуга, Россия

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛОВОЙ КООРДИНАТЫ ОБЪЕКТА В ПЛОСКОСТИ

Рассмотрено углоизмерительное устройство, относящееся к классу интерференционных угломеров, источником излучения в котором служит лазер, а приемным блоком – новый оптический смеситель, защищенный патентом РФ. Показана принципиальная схема интерференционного угломера на основе данного оптического смесителя. Представлены возможные методы проведения измерений, применимые для нового устройства. Приведена принципиальная схема приемного блока, разъяснены его конструктивные особенности и отличительные черты, приведены формулы для расчета геометрических параметров, показан геометрический ход лучей. Рассмотрены основные преимущества нового устройства, такие как повышение точности измерений, уменьшение габаритов и массы прибора, упрощение аппаратной схемы обработки результатов, снижение себестоимости изделия благодаря упрощению конструкции и снижению затрат на сборку, юстировку и контроль прибора. Кратко даны рекомендации для разработчиков данного вида оборудования по области использования и конструктивному решению наиболее эффективных вариантов построения интерференционных угломеров.

Ключевые слова: интерференционный угломер, высокоточные измерения, оптический смеситель, система зеркал, призмный блок, устранение неоднозначности интерференционного отсчета.

Для цитирования: Романова Е. В. Устройство для измерения и регистрации изменения угловой координаты объекта в плоскости // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 27–32.

E. V. Romanova

JSC NPP Kaluga instrument-making plant TYPHOON

A DEVICE FOR MEASUREMENT AND REGISTRATION OF CHANGE OF THE ANGULAR COORDINATE OF THE OBJECT IN PLANE

A measuring device referred to the class of interference goniometers, wherein the source of radiation is a laser, and the receiving unit is a new optical mixer, protected by the RF patent, has been reviewed. A schematic diagram of the interference goniometer based on the given optical mixer is shown. The possible measurement techniques applicable to the new device are presented. A schematic diagram of the receiving unit is presented, its design features and distinctive features are explained, formulas are given for calculating geometric parameters, and the geometric path of the rays is shown. The key advantages of the new device have been reviewed, such as increasing the accuracy of measurements, reducing the dimensions and weight of the device, simplifying the hardware scheme for processing results, reducing the cost of the product through simplified design and cutting costs of assembling, alignment and control of the device. Brief recommendations are given for the developers of this type of equipment in the use and design solution of the most efficient options for constructing interference goniometers.

Keywords: interference goniometer, high-precision measurements, optical mixer, mirror system, prismatic block, elimination of ambiguity of interference count.

For citation: Romanova E. V. A device for measurement and registration of change of the angular coordinate of the object in plan. Radiopromyshlennost, 2018, no. 1, pp. 27–32 (In Russian).

В данной статье рассмотрено новое устройство, защищенное патентом РФ и предназначенное для измерения и регистрации изменения углового положения удаленных объектов.

Основной измерительный процесс определения угла рассогласования с помощью углоизмерительного комплекса проводится по смещению интерференционной картины или изменению линейной ширины полосы в плоскости анализа. Для второго случая необходимо использовать четырехзеркальную схему построения датчика. В то же время изменение линейной ширины интерференционной полосы влияет на точность определения положения интерференционной полосы в плоскости анализа и тем самым на погрешность основных измерений. Для устранения неоднозначности интерференционного отсчета необходимо использование двух каналов, что говорит о предпочтительности двухканального построения углоизмерительного первичного преобразователя [1].

Для решения этой задачи используют метод многофакторного анализа интерференционной картины и метод совпадения дробных частей полосы для монохроматического источника [2, 3].

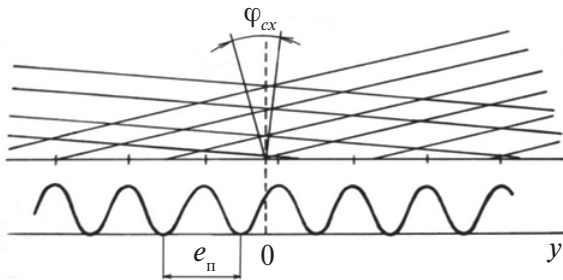


Рисунок 1. Падение волновых фронтов на поверхность датчика

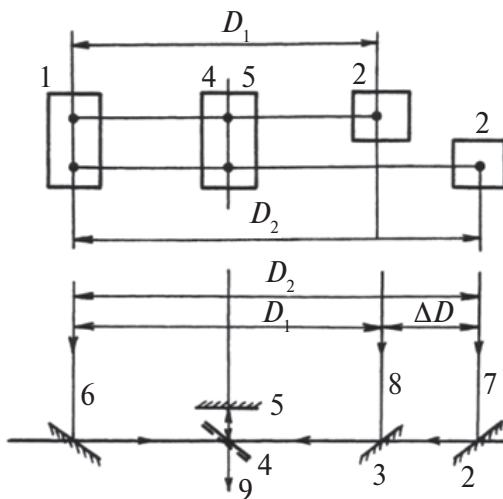


Рисунок 2. Двухканальный интерференционный угломер

При использовании метода многофакторного анализа интерференционного поля определяется не только величина смещения интерференционной картины от первоначального положения, но и величина линейной ширины интерференционной полосы. В таких угловых преобразователях линейная ширина полосы определяется выражением $e_n = \frac{\lambda}{\varphi_0 + 2\alpha}$ и изменяется при изменении угла рассогласования на входе датчика (рис. 1). Такое изменение может быть зарегистрировано только путем введения сканирования интерференционной картины в плоскости анализа. Для устранения неоднозначности интерференционного отсчета должно выполняться условие $m_\alpha < \alpha_n$, где m_α – погрешность измерения угла по изменению линейной ширины полосы, $\alpha_n = \lambda / D$ – угловая ширина интерференционной полосы.

На базе способа совпадения дробных частей полосы для нескольких некратных длин волн излучения был разработан способ устранения неоднозначности для монохроматического источника [4]. Метод реализуется следующим образом (рис. 2): излучение источника засвечивает три приемных зеркала одновременно. После отражения от зеркал 1 и 4 в область анализа попадает излучение от одного из участков волнового фронта. Излучение от второго участка попадает в область анализа после отражения от зеркал 2, 4, 5 и прохождения светоделивателя 4. Затем эти два пучка взаимодействуют с образованием интерференционной картины, положение интерференционных полос в которой зависит от положения источника излучения относительно зеркал 1 и 2. Если объект смещается от первоначального положения, то перемещаются и полосы, что дает информацию о величине и направлении этого смещения. Аналогичным образом работает второй канал. В плоскости анализа образуются и регистрируются две интерференционные картины, угловая ширина интерференционных полос которых определяется расстоянием между приемными зеркалами и отличается в заданное наперед число раз. Поэтому одному и тому же значению угловой координаты объекта относительно приемных зеркал соответствуют разные значения целого числа полос и дробной части в каждом из каналов. Это и является основой для устранения неоднозначности отсчета. Если расстояния между парами приемных зеркал связаны между собой иррациональным соотношением, например, $D_2 = D_1 \sqrt{A}$, где A – число, не являющееся полным квадратом, то неоднозначность будет разрешена во всем диапазоне.

Для определения углового положения объекта используют построенные заранее номограммы (рис. 3).

Оба метода могут быть реализованы на базе нового устройства для измерения и регистрации

изменения угловой координаты объекта в плоскости [5]. Оно также представляет собой двухканальный интерференционный угломер, отличающийся от описанного выше наличием всего лишь одного оптического смесителя. Достигается это за счет применения четырех отражающих поверхностей, использующихся обоими каналами прибора. То есть для каждого канала используется своя отдельная часть (зона) общего приемного блока.

Принцип действия прибора реализован следующим образом (рис. 4): отправленный лазером когерентный пучок напрямую или после отражения от объекта возвращается в приемный узел, состоящий из четырех зеркал, одно из которых является частично пропускающим (светоделительным), а два глухих – образующих базу приема. Из-за смещения источника или поворота объекта (отражателя) возникает оптическая разность хода в двух ветвях каждого канала интерферометра. После того как пучки провзаимодействуют друг с другом, на выходе из системы зеркал образуются две интерференционные картины с шагом полос, не кратным друг другу. По смещению интерференционных полос можно судить об изменении углового положения объекта. Устройством регистрации служит фотоприемное устройство.

Приемный блок состоит из трех зеркальных поверхностей 1, 2 и 4 и одной светоделительной поверхности 3 (рис. 5). Осевые лучи пучков излучения, испускаемых точечным источником, обозначены позициями 5, 6, 7 и 8, а осевые лучи проинтерферировавших пучков обозначены позициями 9 и 10.

Зеркала 1, 2 и светоделительная поверхность 3 имеют одинаковый габаритный размер. Нормали к этим поверхностям лежат в плоскости контроля, обращены к исследуемому объекту и образуют с направлением на объект угол 45° . Светоделительная поверхность 3 симметрична зеркалу 1 и составляет с ним прямой угол. При этом поверхность 3

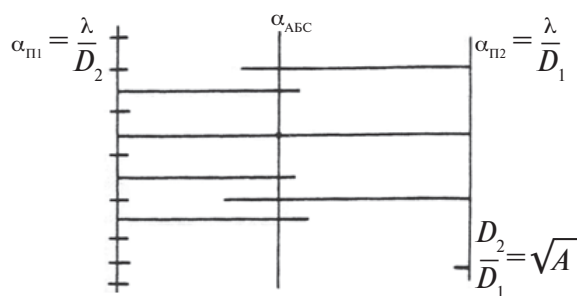


Рисунок 3. Номограмма для поиска абсолютного значения угла, измеренного интерференционным угломером

параллельна зеркалу 2 и расстояние между ними составляет величину, равную их габаритному размеру. Расстояния между осевыми лучами пучков 5 и 6, 7 и 8 в плоскости измерения относятся друг к другу как иррациональное число. Контрзеркало 4 расположено параллельно плоскости измерения, нормаль к его зеркальной поверхности образует с направлением на исследуемый объект угол 180° . Габаритный размер контрзеркала 4 в $\sqrt{2}$ раз меньше габаритного размера поверхности 3, так как контрзеркало 4 является проекцией светоделительной поверхности 3 на плоскость, параллельную плоскости измерения.

Забегая вперед, отмечу, что так как в плоскости анализа образуются интерференционные полосы бесконечной ширины, то для получения линейной ширины полосы угол между зеркалом 1 и частично пропускающим зеркалом 3 делают отличным от 45° на небольшую рассчитываемую величину $\varphi_{\text{сх}}$ порядка $30'$. Зеркала 1 и 2, как уже указывалось выше, образуют базу приема.

Излучение источника одновременно засвечивает приемные зеркала 1 и 2. Левая ветвь первого канала, ось которого обозначена как 5, отражаясь от левого зеркала 1, попадает на зеркальную поверхность 3, отражается от нее и попадает

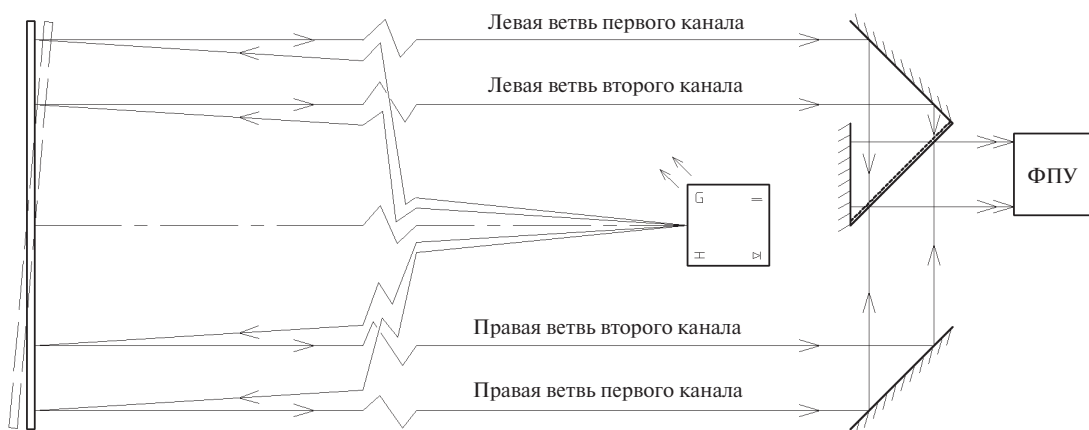


Рисунок 4. Оптическая схема интерферометра

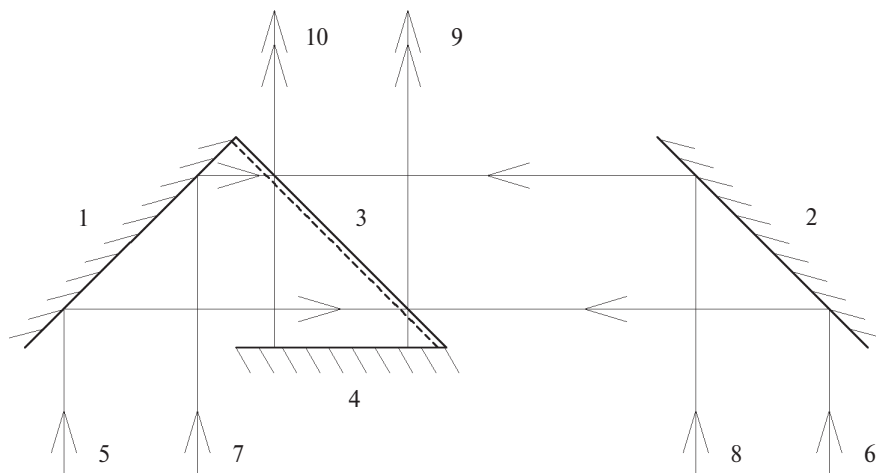


Рисунок 5. Геометрический ход лучей в новом приемном блоке

на контрзеркало 4, от которого так же отражается, возвращается на светоделительную поверхность 3 и проходит через нее в направлении 9. Таким образом в плоскость анализа попадает излучение одного из участков волнового фронта (для первого канала). Правая ветвь первого канала, ось которого обозначена как 6, отражаясь от правого зеркала 2, попадает на светоделительную поверхность 3 и отражается от нее в направлении 9. В результате в плоскость анализа попадает излучение второго участка волнового фронта. Сразу за частично пропускающим зеркалом 3 пучки первого канала, оси которых обозначены как 5 и 6, взаимодействуют, образуя интерференционную картину. Положение интерференционных полос в этой картине зависит от положения источника относительно приемных зеркал 1 и 2. Если объект смещается от первоначального положения, то в плоскости анализа происходит перемещение интерференционных полос, которое можно зафиксировать и получить информацию об изменении углового положения объекта.

Пучки второго канала, оси которых обозначены как 7 и 8, проходят приемную систему аналогично пучкам первого канала и покидают ее в направлении 10. Таким образом, в плоскости анализа образуются и регистрируются две интерференционные картины. Угловая ширина интерференционных полос в каждой из картин определяется расстоянием между осевыми лучами пучков 5 и 6, 7 и 8 соответственно. Так как эти расстояния различны и относятся друг к другу как иррациональное число, то и угловая ширина интерференционных полос для каждой из картин имеет различные значения. Поэтому одному и тому же значению угловой координаты объекта относительно приемных зеркал соответствуют разные значения целой и дробной части интерференционных полос в каждом из каналов, что позволяет устранить неоднозначность интерференционных

измерений. По значениям дробной части в каждом из каналов определяется также и целое число полос и, следовательно, истинное значение угловой величины. Одному и тому же значению дробной части смещения интерференционной полосы одного из каналов соответствуют сразу несколько значений. Значение дробной части, измеренное по второму каналу, также дает неоднозначный отсчет. Совпадение происходит только при одном значении абсолютной величины, в том случае, когда отношение расстояний между осевыми лучами пучков 5 и 6, 7 и 8 равно иррациональному числу, например, квадратному корню из любого числа, не являющегося полным квадратом.

Соотношения между геометрическими параметрами в новом приемном блоке показаны на рис. 6.

Из условия устранения неоднозначности отсчета интерферометра следует, что базы приема каналов должны отличаться друг от друга на иррациональное число:

$$D_1 = D_0 / \sqrt{2}. \quad (1)$$

Из геометрических соотношений следует, что

$$D_1 = D_0 - d_{2\min} \sqrt{2}. \quad (2)$$

Вычитая (2) из (1), получим

$$\frac{D_0}{\sqrt{2}} - D_0 + d_{2\min} \sqrt{2} = 0. \quad (3)$$

Проводим математические преобразования:

$$d_{2\min} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(D_0 - \frac{D_0}{\sqrt{2}} \right); \quad (4)$$

$$d_{2\min} = D_0 \left(\frac{1 \cdot \sqrt{2} - 1}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \right). \quad (5)$$

Таким образом, получаем зависимость минимального размера приемной поверхности зеркала, необходимого для обеспечения устранения

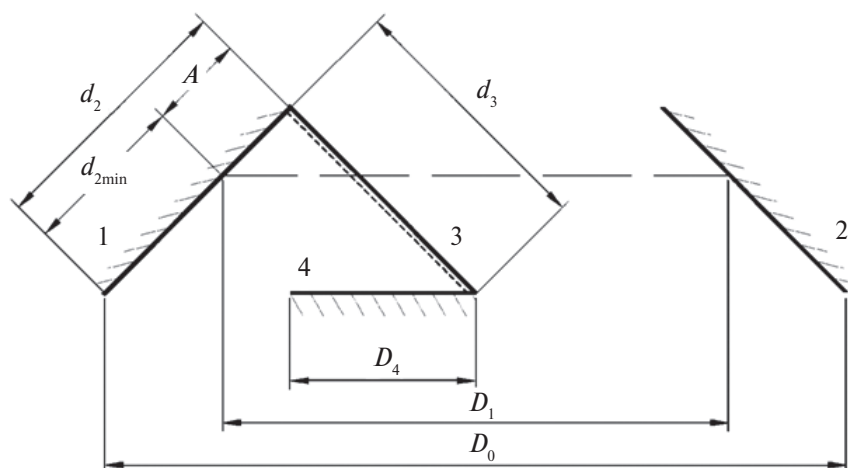


Рисунок 6. Геометрические параметры приемной системы: D_0 – база приема первого канала; D_1 – база приема второго канала; d_2 – размер приемной поверхности зеркал 1 и 2; d_{2min} – минимальный размер приемной поверхности, необходимый для обеспечения устранения неоднозначности отсчета (расстояние между двумя базами D_0 и D_1 в проекции на плоскость приемного зеркала); d_3 – размер светоделительной поверхности 3; D_4 – размер контрзеркала 4; A – проекция сечения пучка канала, необходимого для засветки чувствительной площадки приемника излучения; D_0 – выбирается конструктором исходя из поставленной задачи

неоднозначности отсчета, от размера базы приема первого канала, как одного из важнейших конструктивных параметров системы:

$$d_{2min} = D_0 \left(\frac{\sqrt{2}-1}{2} \right). \quad (6)$$

Как видно из рис. 6,

$$d_2 = d_{2min} + A. \quad (7)$$

А из геометрических соотношений –

$$D_4 = d_3 / \sqrt{2}. \quad (8)$$

Отдельно следует отметить, что описанная выше система может быть реализована как при помощи комбинации зеркал, так и в виде склейки двух призм, на грани которых будут нанесены соответствующие зеркальные и светоделительные покрытия.

Поскольку волновой фронт пучка лазера, пройдя двойное расстояние, возвращается практически плоским, то пучки, прошедшие по левой и правой ветвям, будут практически параллельными друг другу на выходе. В результате интерференционная картина имеет вид полос бесконечной ширины, что нарушает работу прибора. Поэтому, как уже отмечалось выше, необходимо задать определенный угол разворота одной из граней призмы, что позволяет получить интерференционную картину с полосами конечной ширины. Исходя из размеров элементов ПЗС-матрицы, используемой для анализа, выбираем требуемую ширину полосы $l_{пол} = 100$ мкм. Для получения таких полос необходимо угол между одной из граней призмы и ее основанием сделать отличным от 45° , т.е. изменить угол на величину

$$\varphi_{cx} = \frac{\lambda}{l_{пол}} = \frac{0,65 \cdot 10^{-3}}{0,1} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \approx 22,3'. \quad (9)$$

Примем $\varphi_{cx} = 22,3'$. Определим $\varphi_{cx}/2$ в соответствии с рис. 7.

Линейной шириной полосы $e_{п}$ называют наименьшее расстояние между двумя точками интерференционной картины с одинаковой фазой в плоскости анализа. Линейная ширина определяется выражением $e_{п} = \frac{\lambda}{\varphi_{cx}}$, где φ_{cx} – угол сходимости волновых фронтов.

Как правило, угол сходимости волновых фронтов определяется геометрией построения схемы и задается на стадии проектирования и конструирования из условия получения максимальной точности. В ряде схем угол сходимости является функцией угла рассогласования α , и поэтому изменение линейной ширины полосы может использоваться при угловых измерениях с относительно невысокой точностью. В высокоточных измерениях эти изменения приводят к усложнению системы анализа интерференционного изображения и к потере точности.

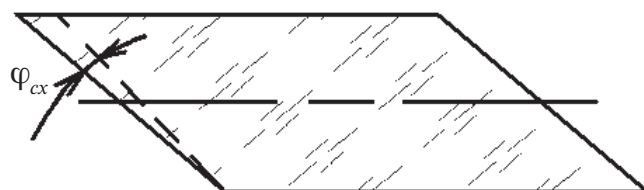


Рисунок 7. Определение $\varphi_{cx}/2$

Обычно на практике используют схемы с постоянной шириной интерференционной полосы или с компенсацией ее изменения в процессе работы [6].

Заключение

Предложенная методика позволит повысить точность измерений в связи с уменьшением количества оптических элементов, для которых важно сохранение взаимного расположения, особенно при использовании призменного блока; уменьшить габариты, массу всего углоизмерительного прибора ввиду механического исключения оптического смесителя второго канала; упростить аппаратную схему обработки результатов измерений с точки зрения устранения конструктивных дефектов (неоднородность стекла, локальные отклонения

от плоскостности, дефекты покрытия, температурные градиенты и др.); снизить себестоимость как из-за непосредственного упрощения конструкции, так и благодаря снижению затрат на сборку, юстировку и контроль параметров такого прибора.

Данная методика может быть полезна разработчикам приборов, используемых в геодезической отрасли для решения углоизмерительных задач, в геотектонике, для определения смещения литосферных плит, в военной и оборонной промышленности – как хранители направления, так как такой прибор позволяет выполнять весь объем измерений даже в том случае, если в начальный момент времени положение лазера на оптической оси не определено, а также в других областях для регистрации и проведения высокоточных угловых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорошев М.В. Устранение неоднозначности отсчета интерференционных угломеров // Известия вузов. Приборостроение. 1981. Т. 23. № 11.
2. Власов В.Л., Медведев А.Н. Прецизионные измерения дробной части относительного сдвига двух систем интерференционных полос // Приборы и техника эксперимента. 1972. № 4. С. 198–200.
3. Прецизионные измерения угловых перемещений объекта в пространстве / В.Г. Выскуб, Л.А. Игошина, В.Л. Мамаев и др. // Измерительная техника. 1974. № 2. С. 11–13.
4. Патент РФ № 1795271, G01b11/26 / Васенков А.А., Хорошев М.В. Способ измерения угловых величин и устройство для его осуществления. Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии: заявл. 19.04.1990; опубл. 15.02.1993. Бюл. № 6.
5. Патент РФ № 2599912, G01B11/26 / Романова Е.В., Хорошев М.В. Устройство для измерения изменения угловой координаты объекта в плоскости. Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК): заявл. 30.01.2014; опубл. 20.10.2016. Бюл. № 27.
6. Привалов В.Е. Лазерные интерферометры для механических измерений. СПб.: Механический институт, 2002. 56 с.

REFERENCES

1. Horoshev M. V. Elimination of the ambiguity of the count of interference angle goniometers. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 1981, vol. 23, no. 11 (In Russian).
2. Vlasov V. L., Medvedev A. N. Precision measurements of the fractional part of the relative shift of two systems of interference fringes. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1972, no. 4, pp. 198–200 (In Russian).
3. Vyskub V. G., Igoshina L. A., Mamayev V. L. et al. Precision measurements of the angular displacements of an object in space. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1974, no. 2, pp. 11–13 (In Russian).
4. Patent RF № 1795271, G01b11/26. Vasenkov A. A., Horoshev M. V. Spособ izmerenija uglovykh velichin i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija [Patent RF no. 1795271, G01b11/26. Method for measuring angular values and a device for implementation of the method]. Moscow Institute of engineers for geodesy, aerophotography and cartography: Appl. 19.04.1990; opubl. 15.02.1993. Bul. no. 6 (In Russian).
5. Patent RF № 2599912, G01B11/26. Romanova E. V., Horoshev M. V. Ustrojstvo dlja izmerenija izmenenija uglovoj koordinaty obekta v ploskosti [Patent RF no. 2599912, G01B11/26. A device for measuring the change in the angular coordinate of an object in plane]. Moscow state University of geodesy and cartography (MIIGAiK): Appl. 30.01.2014; publ. 20.10.2016. Bul. no. 27 (In Russian).
6. Privalov V. E. *Lazernye interferometry dlya mekhanicheskikh izmerenii* [Laser interferometers for mechanical measurements]. Saint-Petersburg, Mekhanicheskij institut, 1992, 56 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Романова Екатерина Витальевна, аспирант, кафедра прикладной оптики, Московский государственный университет геодезии и картографии МИИГАиК, 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4; инженер-конструктор 3-й категории, АО «НПП Калужский приборостроительный завод «ТАЙФУН»», 248009, Калуга, Грабцевское ш., д. 174, тел.: 8 (910) 511-57-75, e-mail: rkaterina.kaluga@mail.ru.

AUTHOR

Romanova Ekaterina, graduate student, Department of Application-Oriented Optics, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 4, Gorokhovskiy pereulok, Moscow, 105064, Russian Federation, design engineer 3st category, JSC Scientific and Production Enterprise Kaluzhsky priborostroitelny zavod TAYFUN, 174, Grabtsevskoye shosse, Kaluga, 248009, Russian Federation; tel.: +7 (910) 511-57-75, e-mail: rkaterina.kaluga@mail.ru.