

УДК 621.398.694.4-531.4
DOI 10.17285/0869-7035.2019.27.2.095-105

Е. Д. БОХМАН, П. А. ИВАНОВ, Р. А. ЛАРИЧЕВ, М. С. НИКОЛАЕВ,
П. А. ПАВЛОВ, Ю. В. ФИЛАТОВ, С. Б. БЕРКОВИЧ, Н. И. КОТОВ

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ НАПРАВЛЕНИЙ

В статье представлены результаты разработки углоизмерительной системы, предназначенной для измерения углов между нормальными к зеркалам, задающим направления в пространстве. Система работает в динамическом режиме с непрерывным вращением платформы, на которой установлен автоколлимационный нуль-индикатор. Измерения угла обеспечены установкой на роторе системы голографического преобразователя угла. Приведены результаты испытаний системы и ее калибровки. Калибровка системы осуществляется путем сличения с эталонной многогранной призмой.

Ключевые слова: угловые измерения, передача направления, динамический гониометр, оптический нуль-индикатор.

Введение

Задачи высокоточного азимутального ориентирования приобретают все большее значение в области как фундаментальной геодезии, так и ее прикладных исследований. Одними из самых востребованных приборов азимутального ориентирования становятся гиротеодолиты, точность которых в настоящее время характеризуется среднеквадратической погрешностью на уровне единиц угловых секунд [1, 2].

Метрологическое обеспечение гироскопических измерений азимута основывается на сличении его значений, получаемых гиротеодолитом, со значениями заблаговременно подготовленных опорных направлений. В работе [3] рассмотрена автоматическая система определения астрономического азимута (АСОА) собственного зеркального контрольного элемента со среднеквадратической по-

Бохман Евгений Давидович. Инженер, Санкт-Петербургский государственный Электротехнический университет «ЛЭТИ» (С.-Петербург).

Иванов Павел Алексеевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры ЛИНС, Санкт-Петербургский государственный Электротехнический университет «ЛЭТИ».

Ларичев Роман Андреевич. Доцент, Санкт-Петербургский государственный Электротехнический университет «ЛЭТИ».

Николаев Максим Сергеевич. Ассистент кафедры ЛИНС, Санкт-Петербургский государственный Электротехнический университет «ЛЭТИ».

Павлов Петр Алексеевич. Профессор, Санкт-Петербургский государственный Электротехнический университет «ЛЭТИ».

Филатов Юрий Владимирович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный Электротехнический университет «ЛЭТИ».

Беркович Сергей Борисович. Доктор технических наук, начальник управления навигационно-геодезических систем, МОУ «Институт инженерной физики» (Серпухов, Московская обл.).

Котов Николай Иванович. Кандидат технических наук, заместитель начальника управления навигационно-геодезических систем, МОУ «Институт инженерной физики».

Статья по докладу на 11-й Российской мультikonференции по проблемам управления, 2018.

Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019

95

погрешностью 0,7". Существует задача передачи направлений от контрольного элемента к зеркальным поверхностям, которые являются хранителями требуемых опорных направлений. Погрешность передачи направлений желательно иметь на уровне 0,3".

Зеркала располагаются в одной горизонтальной плоскости с контрольным элементом (КЭ) АСОА так, чтобы нормали к зеркалам пересекали нормаль к КЭ в одной точке. Углоизмерительную систему размещают таким образом, чтобы ее ось вращения приблизительно совпадала с этой точкой. Задача сводится к измерению углов между рядом направлений, заданных нормальными к зеркалам. В рамках современного развития измерительных технологий задача измерения углов между рядом направлений должна решаться в автоматизированном режиме, обеспечивающем отсутствие ошибок оператора и снижение влияния внешних факторов, т.е. необходимо создание автоматизированной углоизмерительной системы (АУС).

Анализ возможных вариантов решения данной задачи показывает, что при построении АУС лучше всего использовать схемы на основе теодолита и динамического гониометра.

Схема построения АУС на основе теодолита предполагает создание поворотного стола (ПС), оснащенного приводом и измерительным преобразователем угла (ИПУ). Привод должен обеспечивать автоматизированные развороты платформы ПС в горизонтальной плоскости и ее прецизионное позиционирование. На платформе должен устанавливаться цифровой автоколлиматор, обеспечивающий оптическую привязку к хранителям направления (ХН). Угловые положения платформы ПС должны определяться преобразователем угла, ротор которого крепится на роторе ПС, а статор – на его корпусе. Угловое положение контролируемого зеркала определяется суммированием показаний ИПУ и цифрового автоколлиматора.

Погрешность системы будет определяться главным образом погрешностями автоколлиматора и ПС. Для достижения средней квадратической погрешности измерения угла между заданными направлениями 0,3" необходимо, чтобы погрешности автоколлиматора и ПС не превышали 0,2". В настоящее время такие цифровые автоколлиматоры выпускаются рядом зарубежных фирм (MÖLLER-WEDAL OPTICAL, Trioptics и др.). В России подобные приборы не производятся.

Погрешность ПС в основном определяется погрешностью преобразователя угла и качеством подшипников, в которых установлен шпиндель. Необходимо отметить, что на сегодняшний день соответствующей точностью обладает фотоэлектрический преобразователь RON 905 фирмы Heidenhain с погрешностью $\pm 0,2''$ при использовании интерполятора AWE 1024. Он имеет корпусную конструкцию и присоединяется к шпинделю в соответствии с высокими требованиями к соосности установки, декларируемыми производителем. Итоговая погрешность будет определяться качеством соединения ротора датчика и шпинделя стола, а также качеством подшипников шпинделя.

К недостаткам АУС на основе теодолита следует отнести необходимость использования зарубежного оборудования и комплектующих, а кроме того большую длительность измерительной процедуры, обусловленную необходимостью позиционирования перед каждым ХН и определения его положения в течение значительного промежутка времени.

В данной работе рассмотрен случай построения АУС с использованием схемы на основе динамического гониометра, в которой на вращающейся платформе располагается оптический нуль-индикатор (НИ). Контролируемые зеркала

(ХН) и КЭ располагаются таким образом, что нормали к их отражающим поверхностям направлены на ось вращения гониометра. Световой пучок НИ при его вращении падает поочередно на зеркальные поверхности КЭ и ХН. В моменты падения светового пучка НИ по нормали на зеркальные поверхности на выходе НИ вырабатываются импульсы. Выходные импульсы НИ формируют интервалы, в которых суммируются выходные импульсы образцового преобразователя угла, в качестве которого может использоваться кольцевой лазер (КЛ) или оптический преобразователь угла (ОПУ).

Предложенная схема при использовании ОПУ с разрешением и точностью на уровне $0,1''$ должна обеспечивать измерение углов между ХН с погрешностью на уровне $0,2-0,3''$. В работе описывается схема построения АУС и результаты ее испытаний и калибровки.

Схема построения системы на основе динамического гониометра

Динамическая гониометрия [4] с КЛ или ОПУ, непрерывно вращающимся с квазипостоянной скоростью, требует разработки специальных средств для фиксации направлений в динамике. Такое средство (НИ) должно обеспечивать точность фиксации, близкую к точности КЛ или ОПУ, в противном случае суммарная погрешность АУС будет определяться в основном его погрешностью.

Динамический гониометр, предназначенный для измерения углов между нормальными к граням оптических многогранных призм или углов между метками шкалы измерительных преобразователей угла [5, 6], может быть использован и для измерения углов между нормальными к внешним зеркалам или отражателям. В этом случае (рис. 1), как обычно в динамическом угломере, платформа угломера П1 вращается с квазипостоянной скоростью. КЛ или ОПУ устанавливаются на платформе и также вращаются. Для оптической связи с внешними зеркалами (ВЗ) на платформе П1 угломера установлен НИ. Вращение обеспечивается приводом (Пр). Выходные сигналы КЛ или ОПУ и НИ подаются на блок электроники (БЭ), соединенный с персональным компьютером (ПК).

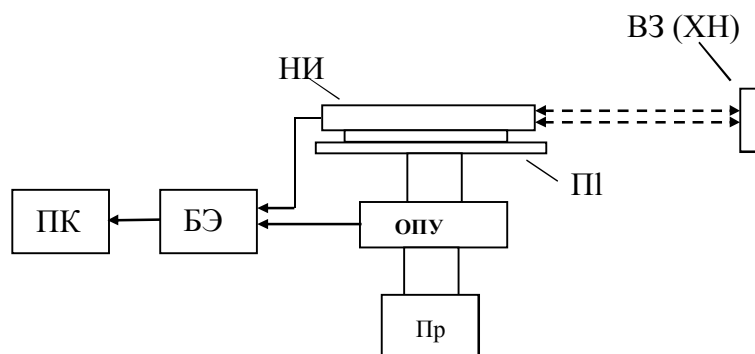


Рис. 1. Схема динамического гониометра, предназначенного для измерения углов между нормальными к внешним зеркалам

Принцип работы системы показан на рис. 2: два внешних зеркала (количество внешних зеркал может быть гораздо больше) – КЭ и ХН расположены таким образом, что нормали к их поверхностям направлены к оси АУС и должны лежать в плоскости, ортогональной оси вращения. Световой луч оптического НИ при вращении падает, в свою очередь, на поверхности внешних зеркал. Вы-

ходные импульсы ОПУ суммируются счетчиком в электронном блоке. Выходные импульсы НИ формируют интервалы суммирования выходных импульсов ОПУ. Импульсная диаграмма в этом случае полностью идентична диаграмме для калибровки многогранных призм. В рассматриваемой системе на вращающейся платформе вместо многогранной призмы устанавливается оптический НИ.

Число выходных импульсов ОПУ между моментами времени падения луча НИ по нормали на КЭ и ВЗ $N_{\phi_{12}}$ определяет угол ϕ_{12} между этими зеркалами.

$N_{\phi_{12}} \cdot \alpha = \phi_{12}$, где α – угловая «цена» выходного импульса ОПУ.

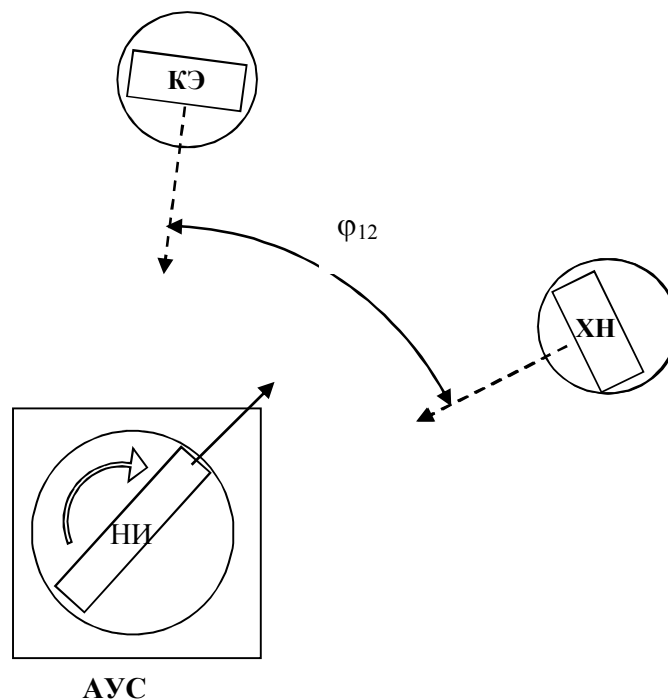


Рис. 2. Вид сверху на схему измерения

Измерение угла производится на каждом обороте платформы. Как и в случае традиционного использования динамического гониометра, рекомендуется проводить процедуру измерения в течение нескольких десятков оборотов платформы и, как следствие, иметь значительное снижение случайной погрешности измерения за счет статистического усреднения.

Применение в динамическом гониометре КЛ не всегда целесообразно по причине его высокой стоимости. В ряде случаев лучше использовать ОПУ. Как отмечалось выше, одним из лучших является инкрементный оптический энкодер RON 905. Для этой цели подойдет также голографический преобразователь угла ЛИР-4200. Его шкала формируется голографическими методами и содержит 324 000 линий на полный оборот (разрешение без интерполяции около 4" на импульс) [7], что почти на порядок лучше, чем у RON 905.

Голографический преобразователь угла ЛИР-4200

Было проведено экспериментальное исследование погрешности голографического преобразователя угла ЛИР-4200 и влияния некоторых параметров на его

точность, в первую очередь эксцентриситета установки статора и ротора преобразователя относительно оси вращения. ЛИР-4200 имеет две считывающие головки, разнесенные на 180° , сигналы от них характеризуются систематическими погрешностями на первой гармонике с амплитудой около $4''$. Эти систематические погрешности находятся в противофазе друг к другу, в результате суммирование их сигналов дает эффективное уменьшение систематической погрешности. Как можно видеть на рис. 3, усреднение сигналов по двум измерительным головкам практически исключает погрешность на первой гармонике, вызванную эксцентриситетом установки измерительной шкалы. Амплитуда первой гармоники характеризует качество установки измерительной шкалы на шпиндель.

На рис. 3 показаны систематические погрешности ЛИР-4200 (после усреднения по двум головкам) при большом и малом эксцентриситете установки измерительной шкалы.

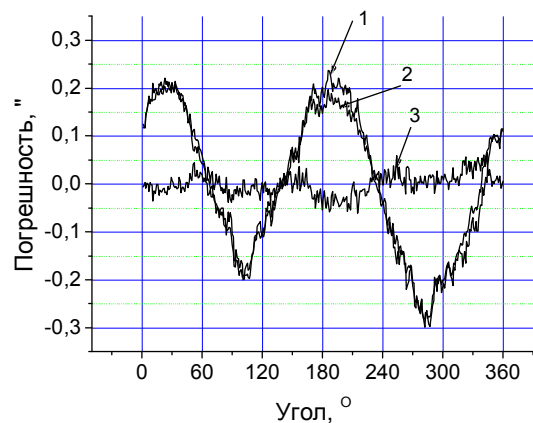


Рис. 3. Систематические погрешности ЛИР-4200 с различным эксцентриситетом установки измерительной шкалы: 1 – эксцентриситет 1,5 мкм, 2 – эксцентриситет 0,3 мкм, 3 – разница между двумя кривыми 1 и 2

Как видно из рисунка, увеличение в 5 раз эксцентриситета установки не дает заметного увеличения систематической погрешности ЛИР-4200. Разность погрешностей при разных эксцентриситетах включает некомпенсированную составляющую на четвертой гармонике. При этом максимальное значение разности погрешностей не превышает $0,05''$.

Важным параметром ОПУ, как любого измерительного прибора, является долговременная стабильность. В нашем случае это долговременная стабильность зависимости погрешности ЛИР-4200 от угла поворота. Для ее определения в течение длительного времени (17 месяцев) проводилось измерение систематической погрешности ЛИР-4200 на системе с воздушным подшипником. Полученные результаты показали, что долговременная стабильность ЛИР-4200 находится в пределах $0,05''$.

Оптический нуль-индикатор

Важным компонентом угломерной системы является оптический НИ. Существует несколько вариантов его построения. Первый – интерференционный НИ [8], который успешно использовался во многих динамических лазерных гониометрах [4]. Он обладает очень высокой точностью (лучше $0,1''$), но его недо-

статком является довольно большое влияние неплоскостности контролируемого зеркала на результат измерений.

Другой вариант – использование автоколлимационного НИ со сканированием направления оптического пучка [9]. В таком НИ оптический луч после прохождения через щель отражается от внутреннего качающегося зеркала, установленного на пьезоэлектрическом преобразователе. Выходной сигнал фотоприемника подается на фильтрующий усилитель, что позволяет получать фильтрацию сигнала на частоте колебания. Данный тип НИ обеспечивает точность на уровне нескольких сотых угловой секунды. Недостатком данного варианта является то, что он требует достаточно низкой скорости вращения. Угловая ширина дифракционной картины составляет обычно около $10''$, тогда если мы имеем частоту колебания 1 кГц, то скорость вращения должна быть не больше $0,5^\circ/\text{с}$. В этом случае длительность измерительной процедуры возрастает до десятков минут, что приводит к возрастанию влияния нестационарных температурных эффектов.

Следует отметить, что неплоскостность контролируемого зеркала существенным образом влияет на результат измерений в случае использования как интерференционного, так и автоколлимационного НИ [10–11]. Для автоколлимационного НИ погрешность несколько ниже, но наиболее существенным является то, что при больших неплоскостностях (порядка интерференционной полосы и более) в сигнале интерференционного НИ возникает существенная неоднозначность.

Третий вариант, который мы считаем с учетом вышесказанного оптимальным для нашей задачи, – это автоколлимационный НИ с простой схемой автоколлимации (щель и объектив) [12], но с оцифровкой выходного сигнала фотоприемника.

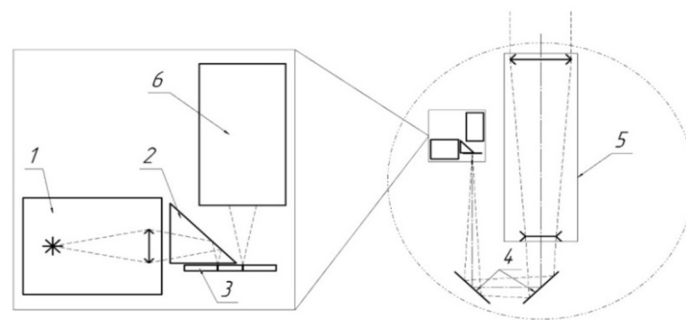


Рис. 4. Оптическая схема автоколлимационного НИ

Схема автоколлимационного НИ показана на рис. 4. Источник света 1 освещает первую щель 3, которая становится источником излучения. При этом свет проходит через призму 2, поворачивающуюся на 90° . Выходящий из первой щели свет отражается от двух зеркал 4 и коллимируется телеобъективом 5. Таким образом формируется параллельный пучок НИ. Когда этот пучок при вращении падает на плоскую отражающую поверхность, которая обращена к НИ, он проходит обратно через объектив и зеркала 4. В момент, когда отражающая поверхность и оптическая ось НИ располагаются по нормали друг к другу, отраженный свет проходит через вторую «анализирующую» щель и попадает в фотоприемник 6. После этого выходной сигнал от фотоприемника оцифровывается.

3D-модель реализованного автоколлимационного НИ и его функциональных элементов представлена на рис. 5. Поскольку НИ устанавливается на поворотный стол, он должен быть компактным. С другой стороны, чтобы получить вы-

сокое угловое разрешение, необходимо наличие объектива с достаточно большим фокусным расстоянием. Это противоречие разрешалось путем использования телеобъектива с фокусным расстоянием 1 м и разворотом оптической оси прибора двумя зеркалами. Излучающая и анализирующая щели совмещены на одной подложке, что делает их регулировку более легкой. Оцифровка выходного сигнала фотоприемника позволяет отказаться от пороговой схемы, на работу которой сильно влияет деформация выходного импульса, и точно оценить момент, когда отражатель оказывается перпендикулярным оптической оси НИ за счет использования всей энергии сигнала. В нашем случае за этот момент принимается временная отметка, соответствующая энергетическому центру выходного импульса.

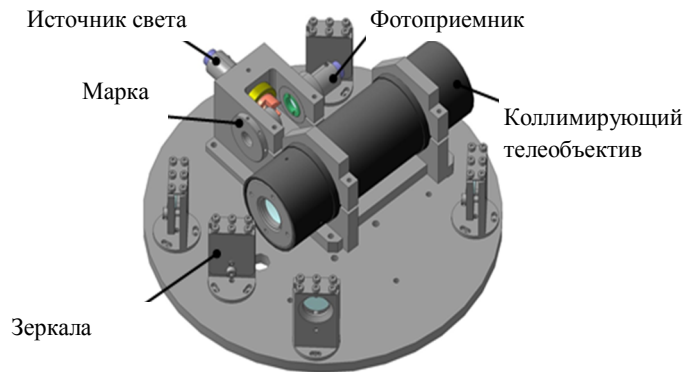


Рис. 5. 3D-модель автоколлимационного нуля-индикатора

Экспериментальные данные показали, что на точность всей системы с автоколлимационным НИ существенным образом влияет наклон щели вокруг оптической оси НИ. Наклон щели на 30" может привести к погрешности на первой гармонике с амплитудой несколько угловых секунд в том случае, когда параллельность оси вращения АУС и наружных зеркал отрегулирована с точностью 1'. Это приводит к дополнительным требованиям по юстировке щелей НИ.

Испытания автоматизированной углоизмерительной системы

Внешний вид АУС представлен на рис. 6. Ротор ЛИР-4200 смонтирован на валу системы, а статор закреплен на ее основании. Вращение вала обеспечено двигателем постоянного тока. Скорость вращения поддерживается на уровне 180 °/с. На верхней части вала установлена поворотная платформа с автоколлимационным НИ. Электронный блок предварительной обработки сигналов расположен также на поворотной платформе.

Система работает следующим образом. В моменты времени, когда пучок НИ падает нормально на зеркала, происходит генерация импульсов на выходе НИ, которые формируют интервалы суммирования выходных импульсов ОПУ. Выходной импульс НИ имеет почти треугольную форму. На переднем фронте импульса схема предварительной обработки формирует ТТЛ-импульс, который за-



Рис. 6. Внешний вид АУС

пускает работу АЦП и анализ счетчиков выходных импульсов ОПУ. На спадающем фронте импульса схема предварительной обработки формирует ТТЛ-импульс, который останавливает работу АЦП. АЦП оцифровывает аналоговый выходной сигнал НИ, а электроника предварительной обработки находит его «центр тяжести». Эта операция позволяет реализовать процедуру завершения счета (определение дробной части периода выходного сигнала ОПУ с использованием известных методов интерполяции, например временного метода) при суммировании выходных импульсов ОПУ и обеспечить необходимую точность угловых измерений.

Испытания АУС проводились при ее установке на фундаменте, настройке и выставке для обеспечения автоматической автоколлимационной привязки к контрольному элементу АСОА. Зеркальные контрольные элементы (ХН) располагались по окружности на специальных фундаментах в соответствии со схемой на рис. 2. Испытания проводились в режиме серий измерений с выводом результатов на экран блока обработки и отображения информации.

Полученные результаты испытаний подтвердили, что с использованием АУС возможно автоколлимационное визирование на зеркальные ХН, расположенные на расстоянии до 2 м, а также измерение горизонтальных углов в диапазоне от 0 до 360°.

В ходе испытаний оценивались следующие точностные параметры АУС:

- математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений каждого отдельного угла, полученных в серии измерений;
- отличие суммы измеренных АУС углов от 360°.

Для оценки математического ожидания (среднего) и СКО (внутренней сходимости) результатов измерений была проведена серия из шести циклов последовательных измерений углов (по кругу) между КЭ АСОА и ХН. Результаты измерений и оценки их погрешностей приведены в таблице.

Т а б л и ц а

№ цикла	КЭ – ХН№1	ХН№1 – ХН№2	ХН№2 – ХН№3	ХН№3 – КЭ
1	74° 27' 38,86"	43° 32' 57,76"	160° 29' 24,77"	81° 29' 58,59"
2	74° 27' 38,86"	43° 32' 57,79"	160° 29' 24,71"	81° 29' 58,65"
3	74° 27' 38,86"	43° 32' 57,83"	160° 29' 24,65"	81° 29' 58,66"
4	74° 27' 38,99"	43° 32' 57,81"	160° 29' 24,64"	81° 29' 58,57"
5	74° 27' 38,22"	43° 32' 57,88"	160° 29' 24,68"	81° 29' 58,65"
6	74° 27' 38,78"	43° 32' 57,88"	160° 29' 24,67"	81° 29' 58,69"
Среднее	74° 27' 38,76"	43° 32' 57,83"	160° 29' 24,69"	81° 29' 58,64"
СКО	0,27"	0,05"	0,05"	0,05"

Отличие суммы полученных значений углов от 360° составляет –0,08", что достаточно хорошо характеризует сходимость результатов измерений.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют о том, что случайная погрешность измерительной системы не превышает 0,3". Вместе с тем проведенные испытания не дают информации о систематической погрешности, определение которой проводилось в процессе калибровки измерительной системы.

Калибровка углоизмерительной системы

Очевидный способ калибровки системы измерения угла реализуется с помощью стандартного образцового поворотного стола. В этом случае система

измерения угла должна быть установлена на его платформе. На неподвижном основании размещается зеркало. Другое зеркало должно быть закреплено на платформе поворотного стола. В одном положении платформы система измерения угла производит измерение угла между зеркалом на платформе поворотного стола и неподвижным зеркалом. Затем платформу необходимо повернуть на некоторый заданный угол.

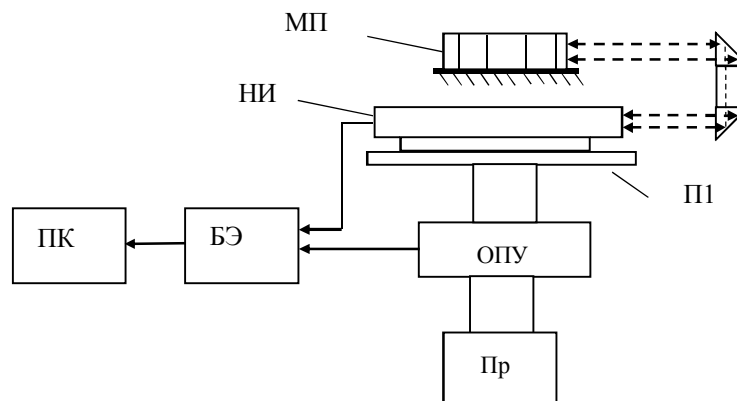


Рис. 7. Схема калибровки измерительной системы с использованием эталонной многогранной призмы

В этом случае угол между двумя зеркалами изменяется. Угол между зеркалами измеряется перед поворотом и после него. Разница между этими измерениями сравнивается с величиной угла, заданной образцовым поворотным столом. Недостатком данного способа калибровки является то, что на платформу поворотного стола обычно нельзя устанавливать достаточно тяжелую измерительную систему.

Другой вариант калибровки осуществляется путем сравнения результатов измерения углов между гранями эталонной многогранной призмы (МП) с их паспортными значениями. Для этого луч НИ должен быть развернут таким образом, чтобы упасть на грани МП, которая устанавливается над измерительной системой (рис. 7).

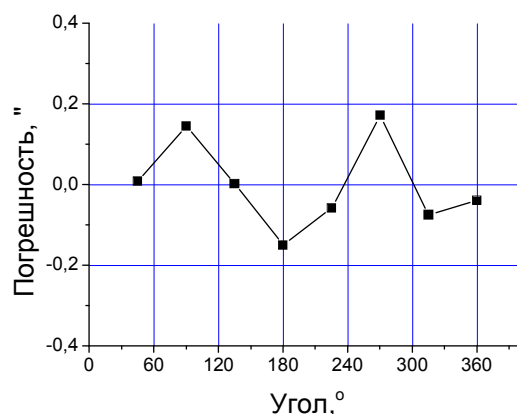


Рис. 8. Результаты калибровки углоизмерительной системы

Калибровка проводилась с использованием 8-гранной эталонной призмы. Измерения в процессе калибровки проводились в течение 10 оборотов платформы АУС. Случайная погрешность измерений в этом случае находилась на уровне 0,05". Результаты измерений углов между гранями эталонной МП были сопоставлены с паспортом МП. Различия представлены на рис. 8. Из рисунка видно, что разность не превышает 0,2". Погрешность паспортизации МП составляла 0,1".

Полученные результаты позволяют утверждать, что случайная погрешность разработанной системы измерения угла не превышает 0,3", а систематическая – 0,2".

Заключение

Задача измерения углов между нормальными к внешним зеркалам, рассматриваемая в данной работе, может быть эффективно решена с помощью системы на основе динамического гониометра. Такая система была разработана с использованием платформы, вращающейся с автоколлимационным нуль-индикатором, и голографического преобразователя угла. Результаты, полученные при проведении испытаний, показали, что случайная погрешность измерения угла не превышает 0,3". Результаты калибровки системы, осуществленной путем сличения с эталонной многогранной призмой, характеризуют систематическую погрешность на уровне 0,2".

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.kip-guide.ru/> Гиротеодолиты GUROMAT 3000.
2. <http://www.gtk-leica.ru/> GUROMAT 5000.
3. **Гайворонский С.В., Беркович С.Б., Котов Н.И., Махаев А.Ю., Садеков Р.Н., Цодокова В.В.** Автоматическая система определения астрономического азимута // Метрология. Ежеквартальное приложение к научно-техническому журналу «Измерительная техника». 2015. №1. С. 11–20.
4. **Burnashev, M.N., Pavlov, P.A., Filatov, Yu.V.**, Development of precision laser goniometer systems, *Quantum Electronics*, 2013, 43(2), 130–138.
5. **Astrua, M., Ichim, D., Pennecchi, F., Pisani, M.**, Statistical techniques for assessing the agreement between two instruments, *Metrologia*, 2007, 44, 385–392.
6. **Qin, S., Huang, Z., Wang, X.**, Optical angular encoder installation error measurement and calibration by ring laser gyroscope, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59 (3), 506–511.
7. **Barinova, E.A., Gordeev, S.V., Ivashchenko, E.M., Pavlov, P.A.**, Optophysical measurements: A method and the results of investigating the random error of an optical angle encode, *Measurement techniques*, 2011, 54 (9), 1075–1080.
8. **Nikolaev, M.S., Filatov, Yu. V.**, Methods of calibrating prisms with faces that have no reflective coating, using a dynamic goniometer, *Journal of Optical Technology*, 2011, 78 (3), 224–226.
9. **Kinnane, M.N., Hudson, L.T., Henins, A. Mendenhall, M.H.**, A simple method for high-precision calibration of long-range errors in an angle encoder using an electronic nulling autocollimator, *Metrologia*, 2015, 52, 244–250.
10. **Stone, J.A., Amer, M., Faust, B., Zimmerman, J.**, Uncertainties in Small-Angle Measurement Systems Used to Calibrate Angle Artifacts, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2004, 109, 319–333.
11. **Филатов Ю.В., Ларичев Р.А.** Влияние топографии отражающей поверхности на угловые измерения с использованием автоколлиматора // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. Вып. 3. С. 90–97.
12. **Larichev, R.A., Filatov, Y.V.**, An autocollimation null detector: Development and use in dynamic goniometry, *Journal of Optical Technology*, 2013, 80 (9), 554–557.

Bokhman, E.D., Ivanov, P.A., Larichev, R.A., Nikolaev, M.S., Pavlov, P.A., Filatov, Yu.V. (Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia), **Berkovich, S.B., and Kotov, N.I.** (Institute of Engineering Physics, Serpukhov, 142210 Russia)
Automated Angle Measurement System for Directions Transmission, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 2 (105), pp. 95–105.

Abstract. The paper presents the results of development of an angle measurement system for measuring the angles between the normals to the mirrors setting the directions in space. The system operates in a dynamical mode with a continuously rotating platform on which an autocollimating null indicator is installed. The angles are measured by means of a holographic angle encoder installed on the rotor of the system. The results of the system testing and calibration are presented. The system is calibrated by comparing it to a reference optical polygon.

Key words: angle measurements, direction transmission, dynamic goniometer, optical null indicator.

REFERENCES

1. http://www.kip-guide.ru/Gyrotheodolites/GUROMAT_3000.
2. http://www.gtk-leica.ru/GUROMAT_5000.
3. **Gaivoronskii, S.V., Berkovich, S.B., Kotov, N.I., Makhaev, A.Yu., Sadekov, R.N., and Tsodokova, V.V.**, An Automatic system for determining astronomical azimuth, *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 3, pp. 280–285.
4. **Burnashev, M.N., Pavlov, P.A., and Filatov, Yu.V.**, Development of precision laser goniometer systems, *Quantum Electronics*, 2013, vol. 43, no. 2, pp. 130–138.
5. **Astrua, M., Ichim, D., Pennecchi, F., and Pisani, M.**, Statistical techniques for assessing the agreement between two instruments, *Metrologia*, 2007, vol. 44, no. 5, pp. 385–392.
6. **Qin, S., Huang, Z., and Wang, X.**, Optical angular encoder installation error measurement and calibration by ring laser gyroscope, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 2010, vol. 59, no. 3, pp. 506–511.
7. **Barinova, E.A., Gordeev, S.V., Ivashchenko, E.M., and Pavlov, P.A.**, Optophysical measurements: A method and the results of investigating the random error of an optical angle encode, *Measurement techniques*, 2011, vol. 54, no. 9, pp. 1075–1080.
8. **Nikolaev, M. S., and Filatov, Yu. V.**, Methods of calibrating prisms with faces that have no reflective coating, using a dynamic goniometer, *Journal of Optical Technology*, 2011, vol. 78, no. 3, pp. 224–226.
9. **Kinnane, M.N., Hudson, L.T., Henins, A., and Mendenhall, M.H.** A simple method for high-precision calibration of long-range errors in an angle encoder using an electronic nulling autocollimator, 2015, *Metrologia*, vol. 52, no. 2, pp. 244–250.
10. **Stone, J.A., Amer, M., Faust, B., and Zimmerman, J.**, Uncertainties in small-angle measurement systems used to calibrate angle artifacts, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2004, vol. 109, no. 3, pp. 319–333.
11. **Filatov, Yu.V., and Larichev, R.A.**, Influence of the topography of the reflecting surface on angular measurements using an autocollimator, *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2012, no. 3, pp. 90–97.
12. **Larichev, R.A., and Filatov, Yu.V.**, An autocollimation null detector: Development and use in dynamic goniometry, *Journal of Optical Technology*, 2013, vol. 80, no. 9, pp. 554–557.

Материал поступил 29.12.2018