

7. Латыев С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. Л., Машиностроение, 1985.

8. Иващенко Е. М., Павлов П. А. Исследования динамических гониометров с оптическим датчиком угла // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 25—27.

9. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб.: Политехника, 2007.

10. Иващенко Е. М. Лазерный динамический гониометр с улучшенными характеристиками // Гирскопия и навигация. 2012. № 2 (77). С. 151.

11. А. с. 1647224 СССР. Устройство для ограничения поворота статора преобразователя круговых перемещений / А. Л. Гореев, С. С. Митрофанов, С. М. Латыев, С. М. Колосков, Г. В. Егоров // Открытия. Изобретения. 1991. № 17.

12. Королев А. Н., Гарцуев А. И. Цифровой двухкоординатный автоколлиматор с разрешением 0,001" // Измерительная техника. 2004. № 12. С. 29—32.

Дата принятия 11.02.2015 г.

681.2.531.71

Прецизионные цифровые фотоэлектрические измерительные головки отклонения

В. Н. ЯНУШКИН, Ю. Б. КОЛЯДА, Н. Т. КРУШНЯК

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: yura_kolyada@mail.ru

Рассмотрено применение растровых решеток при создании прецизионных цифровых фотоэлектрических преобразователей для модульных и компонентных измерительных головок отклонения двух- и трехкоординатных приборов измерений линейно-угловых перемещений. В качестве измерительных преобразователей использована экстремальная счетно-интерполяционная система измерения перемещений.

Ключевые слова: прецизионные цифровые преобразователи, экстремальная счетно-интерполяционная система измерений.

The raster grids application during creation of the precise digital photoelectric converters for modular and component measuring deflection heads of two and three-coordinate instruments for measuring the linear and angular displacement is considered. The extreme counting interpolation displacement measuring system is used as a measuring converters.

Key words: precision digital converters, extreme calculating interpolation measurement system.

Измерительные головки (ИГ) — важнейшие узлы координатных измерительных машин (КИМ), обеспечивающие связь деталей с системами измерения координат, и в значительной степени определяющие их точность, универсальность и производительность. Реализуемые в КИМ способы измерений, требования к системе управления, номенклатура решаемых метрологических задач определяются типом и функциональными параметрами ИГ [1]. Измерительные головки, подобные используемым в КИМ, применяют в различных приборах и машинах для измерения длины.

В настоящее время разработано большое количество ИГ, которые можно классифицировать по разным признакам. По принципу действия их разделяют на жесткие, электрические, электронные и оптические; по методу измерений — на измерительные головки нулевые (ИГН) и измерительные головки отклонения (ИГО); по моменту съема информации — на ИГ касания (триггерные, сигнальные, переключающие, индикаторы контакта) и ИГ управляющие, которые, в свою очередь, подразделяются на считывающие координаты и управляющие движением подвижных узлов КИМ; в зависимости от числа степеней свободы — на одно-, двух- и трехкоординатные, т. е. ИГ 1D, 2D и 3D.

Дискретный сигнал в нулевой точке, используемый для считывания показаний или управления перемещением

подвижных частей КИМ, вырабатывается в ИГН, а с помощью ИГО можно еще измерить перемещение наконечника относительно нулевой точки ИГ, так как в такую головку встроены измерительный преобразователь перемещений.

В зависимости от направления смещения наконечника ИГ делятся на осевые (модульные) и векторные (компонентные, двух- и трехкомпонентные). Самые точные из них — это компонентные ИГ, их точность в основном определяется погрешностью преобразователей и составляет $\pm(0,3—0,5)$ мкм, что не отвечает современным требованиям.

Наиболее точными являются КИМ портального и комбинированного типов. Подавляющее большинство таких машин (до 90 %) оснащены растровыми фотоэлектрическими цифровыми фазовыми счетно-интерполяционными измерительными системами координат [2]. Метрологические параметры этих систем следующие: растры с шагом (периодом) 8—20 мкм, внутришаговая погрешность 0,02—0,05 мкм, дискретность отсчета 0,1 мкм, зазор между растрами 0,1 мм, допустимое изменение зазора — 10 %.

В некоторых КИМ повышенной точности используют дифракционные решетки длиной 300 мм и периодом 1 мкм. Для увеличения диапазона измерений решетки состыковывают,

но используют не более двух мер. Точность стыковки составляет $\pm 2,5$ периода меры [3].

Модульные и компонентные ИГ предназначены для работы с КИМ высокой точности. В настоящее время в качестве первичных преобразователей в них применяют индуктивные преобразователи [1]. Существенный и принципиальный недостаток таких устройств — нелинейность функции преобразования, которая ограничивает диапазон измерений. Кроме того, в индуктивных преобразователях не заложена мера, поэтому их необходимо периодически калибровать и поверять в процессе эксплуатации, что усложняет работу КИМ. Процедура согласования аналогового сигнала индуктивных ИГ и цифровых фотоэлектрических систем измерения координат КИМ тоже затруднительна.

Оптимальным решением перечисленных выше проблем является применение цифровых фотоэлектрических растровых преобразователей в системах измерения перемещений координат КИМ и в компонентных ИГО [4]. Фотоэлектрические измерительные системы, в которых аналогом перемещения является один из параметров сигнала (амплитуда или фаза), существенно проигрывают в технико-технологическом плане экстремальным, так как в последних реализован самый точный метод измерений — метод замещения при компенсационном преобразовании, при котором точность повышается на порядок и более. Интерполяционный канал со сканирующим компенсационным интерполятором (СКИ) в экстремальной системе обладает важным свойством инвариантности к амплитуде и гармоническому составу сигнала [5]. В экстремальном интерполяторе использован один фотоприемник, поэтому нет необходимости в согласовании спектральных характеристик осветителя и множества фотоприемников как в фазовых интерполяторах. Точность экстремального интерполятора определяется только аддитивной погрешностью, зависящей от погрешностей наведения на экстремум освещенности измерительного сопряжения и нестабильностью центра колебания индикаторного элемента измерительного сопряжения, связанного с якорем СКИ.

В предыдущих публикациях авторов [4, 6] показано, что точность, надежность, быстродействие и стабильность такой системы достигаются в результате следующих действий:

рациональным совмещением в одном измерительном устройстве системы реверсивного счета квадратурных сигналов от двух фотоприемников, соответствующих периодам мелкопериодических структур, которые используют в качестве мер для образования шкал;

при эксплуатации преобразователя с совмещенными функциями СКИ, включающего сканатор, обеспечивающий работу измерительного канала на переменном токе с целью улучшения стабильности системы, компенсатор, позволяющий реализовать метод замещения однородных физических величин при нулевом компенсационном сравнении этих величин, а также интерполятор, работающий от одного из двух фотоприемников квадратурных сигналов, что обеспечивает автоматическое согласование схемно-, алгоритмически-счетной и интерполяционной ступеней отсчета;

при применении усилителя переменного тока с обратной связью, охватывающей все звенья интерполятора, в которой применены СКИ и цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), имеющие высокоточные показатели по линейности преобразования.

Фотоэлектрический экстремальный растровый преобразователь со СКИ и двухотсчетная измерительная система

могут быть реализованы в самых разнообразных конструктивных вариантах и не имеют ограничения по использованию [7—10].

Модульные и компонентные ИГ представляют сочетание механической части преобразования перемещений и оптико-электронной метрологической (измерительной) части получения информации о перемещениях по координатам, что требует творческого подхода при их конструктивной реализации.

В [1] рассмотрены варианты механизмов модульного преобразования, обеспечивающего трансформацию любого измерительного перемещения в пространстве или плоскости в перемещение в одном направлении. Модульный механизм выполняет также функцию узла создания измерительного усилия [1]. Модульные ИГО применяют в двухкоординатных приборах (микроскопах).

В трехкоординатных (трехкомпонентных) ИГ требуется сочетание модульной головки, работающей в горизонтальной плоскости, с ИГ, функционирующей в вертикальной, что существенно усложняет их конструкцию [11, 12]. Авторы в научных разработках, где был применен экстремальный растровый фотоэлектрический преобразователь использовали разнообразные типы направляющих в виде параллелограммного механизма с упругими элементами и микроподшипниками в подвижных узлах. Сочетание таких устройств позволяет моделировать различные варианты компонентных ИГО.

При проектировании экспериментальных ИГО за основу механической части был принят параллелограммный механизм на плоских пружинных направляющих, выполняющий функцию модульного [6]. Внутри модуля располагаются все элементы однокоординатного преобразователя перемещений, что делает параллелограммный механизм удобным в эксплуатации. Разработка трехкомпонентных ИГО таким образом сводится к конструктивному объединению модулей и созданию соответствующей системы уравнивания измерительных наконечников. При этом модули экспериментальной компонентной головки не содержат кинематических пар с внешним трением и поэтому имеют малые погрешности.

По степени влияния на погрешность КИМ, определяемой аппаратной частью, основными источниками являются механическая конструкция, реализующая координатную систему этих машин, измерительные системы координат и ИГ. Анализ точностных возможностей прецизионных и малогабаритных КИМ показывает, что между погрешностями, вносимыми измерительными системами координат, механической частью координатных перемещений и ИГ существует соотношение 1: (1—2): 1 [13].

Для компонентных ИГО, как правило, приводят следующие метрологические параметры: диапазон измерений, диапазон перемещения подвижных наконечников, дискретность отсчета, измерительная сила.

На рис.1 представлена функциональная схема однокоординатного модуля, включающая следующие элементы: магнитоэлектрический СКИ 1, измерительный растр 2, осветитель 3, индикаторный растр 4, два фотоприемника 5. Буквами А, В, С обозначены цепи, соединяющие ИГ и электронный блок [4]. Конструктивная реализация ИГ и электронного блока существенно не меняется в зависимости от вида измерительных систем, построенных по одному принципу действия. Интерполяционный канал со СКИ, использующий

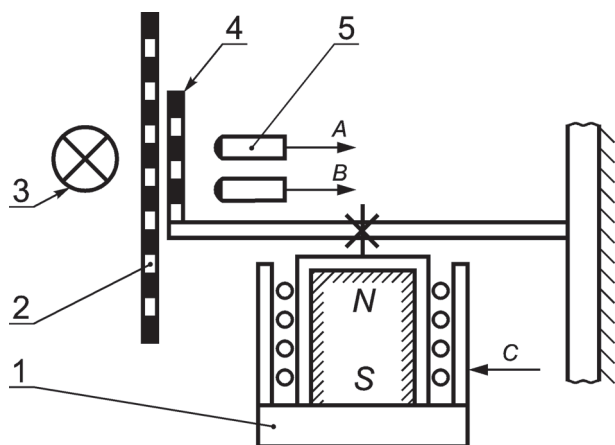


Рис. 1. Функциональная схема однокоординатного модуля:

1 — магнитоэлектрический СКИ; 2 — измерительный растр; 3 — осветитель; 4 — индикаторный растр; 5 — фотоприемники

компенсационное преобразование и метод замещения, при измерении в экстремальных системах обладает свойством инвариантности к амплитуде и гармоническому составу сигнала, т. е. к дрейфу параметров источника излучения, измерительного сопряжения и элементов прямой ветви канала преобразования сигнала. Работа канала счета периодов меры на переменном токе без демодуляции повышает быстродействие и надежность работы измерительной системы [14].

Конструкция из двух вертикально расположенных и связанных между собой параллелограммных механизмов, повернутых на 90° в горизонтальной плоскости относительно друг друга, образует двухкоординатную ИГО. При определенных условиях аналогом такой ИГО может стать параллелограммный механизм на цилиндрических пружинах с взаимно перпендикулярным направлением перемещения. Эта конструкция позволит уменьшить габаритные размеры ИГО при необходимости использования крестообразной растровой меры, выполненной на одной подложке. Конструкция из двухкоординатной ИГО и еще одного параллелограммного

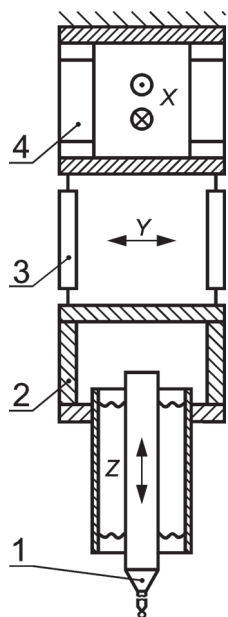


Рис. 2. Принципиальная схема механической части ИГО:

1 — измерительный наконечник; 2 — корпус; 3, 4 — параллелограммные механизмы продольной и поперечной координат

механизма, установленного вертикально и повернутого на 90° в вертикальной плоскости, образует трехкоординатную ИГО [1]. Достаточно компактную конструкцию трехкомпонентной ИГО образует параллелограммный механизм на цилиндрических пружинах и ИГ микромера, в котором используется подвеска измерительного стержня на фигурных пружинах [13].

Конструкция из двух параллелограммных механизмов на плоских пружинах и цифрового микромера [13] образует трехкомпонентную ИГО. Схема ее механической части представлена на рис. 2. Два параллелограммных механизма 3, 4 и цифровой микромер, включающий корпус 2 и измерительный наконечник 1, образуют трехкомпонентную ИГО.

Устройство, выполненное на базе цифрового растрового микромера [13], дает отсчет по вертикальной координате Z, два параллелограммных механизма обеспечивают отсчет показаний по продольной и поперечной координатам Y, X, соответственно.

Диапазоны измерений ИГО по координатам X, Y составляют $\pm 2,5$ мм, по координате Z: 0—0,5 мм, дискретность отсчета варьируется из-за изменения шага растровых мер и индекса интерполяции в пределах 0,1—0,01 мкм, измерительное усилие определяется конфигурацией упругих элементов параллелограммных механизмов.

Вывод. Использование в компонентах ИГО и координатах КИМ цифровой фотоэлектрической экстремальной счетно-интерполяционной системы измерений линейно-угловых перемещений наиболее перспективно. Это существенно повышает точность, надежность и ремонтопригодность, что подтверждено опытом эксплуатации растровых длиномеров, выпущенных малой серией и до настоящего времени находящихся в эксплуатации [6].

Литература

1. Гапшис В. А. А., Каспарайтис А. Ю., Модестов М. В., Раманаускас З. А., Серков Н. А., Чудов В. А. Координатные измерительные машины и их применение. М.: Машиностроение, 1988.
2. Голубовский Ю. М., Пивоварова Л. Н., Афанасьева Ж. К. Фотоэлектрические преобразователи линейных и угловых перемещений // Оптико-механическая промышленность. 1984. № 8. С. 50—58.
3. Каспарайтис А. Ю., Мураускас П. Р., Шимуленис Ю. Ю. Анализ погрешностей, возникающих при стыковке растровых линеек // Станкостроение Литвы. 1980. № 12. С. 71—78.
4. А. с. 1422002 СССР. Устройство для измерения перемещений / А. В. Мироненко, Г. П. Дмитриев, Ю. Б. Коляда, В. Н. Янушкин // Открытия. Изобретения. 1988. № 33.
5. Коляда Ю. Б., Янушкин В. Н. Комплексное решение проблемы повышения точности измерения линейно-угловых перемещений // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 20—23.
6. Янушкин В. Н., Коляда Ю. Б., Крушняк Н. Т. Приоритетное направление проектирования прецизионных средств измерения линейных и угловых величин // Метрология. 2014. № 5. С. 21—27.
7. Коляда Ю. Б., Королев Ю. С., Разгулин В. Г., Янушкин В. Н. Цифровой фотоэлектрический интерферометр для измерения перемещений // Измерительная техника. 2001. № 6. С. 17—18.

8. Коляда Ю. Б., Королев Ю. С., Разгулин В. Г., Янушкин В. Н. Микроскоп измерительный цифровой // Измерительная техника. 2005. № 5. С. 20—23.

9. Коляда Ю. Б., Полярус Н. Т., Королев Ю. С., Разгулин В. Г., Янушкин В. Н. Головки измерительные цифровые // Измерительная техника. 2007. № 1. С. 20—23.

10. Янушкин В. Н., Коляда Ю. Б., Крушняк Н. Т. Длинномер фотоэлектрический цифровой // Измерительная техника. 2013. № 10. С. 23—24.

11. Модестов М. Б., Чудов В. А. Принципы построения измерительных головок для автоматических координатных машин. М.: Наука, 1976.

12. Модестов М. Б. Исследование точности модульных головок для координатных измерительных машин с ЧПУ. М.: Наука, 1976.

13. Каспарайтис А. Ю., Куметайтис Ю. П. Конструкция и точность координатных измерительных машин // Станкостроение Литвы. 1982. № 14. С. 12—27.

14. Коляда Ю. Б., Королев Ю. С., Крушняк Н. Т., Разгулин В. Г., Янушкин В. Н. Перспективы и проблемы автоматизации, повышения точности, быстродействия и надежности измерения линейных и угловых величин // Измерительная техника. 2011. № 9. С. 21—23.

Дата принятия 13.01.2015 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

550.344.33

Наблюдение собственных колебаний Земли лазерными интерферометрами-деформографами

В. К. МИЛЮКОВ^{1,4}, М. П. ВИНОГРАДОВ¹, А. В. ЛАГУТКИНА¹, А. П. МИРОНОВ¹,
А. В. МЯСНИКОВ¹, Н. А. ПЕРЕЛЫГИН¹, Б. Г. ПУСТОВИТЕНКО²,
О. В. БОБОРЫКИНА³, Ю. М. ВОЛЬФМАН², В. А. НАСОНКИН³

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: milyukov@sai.msu.ru

²Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Россия,
e-mail: bpustovitenko@gmail.com

³Геофизическая обсерватория, Севастополь, Россия

⁴Владикавказский научный центр РАН и СО-А, Владикавказ, Россия

По деформационным данным, полученным с помощью прецизионных лазерных интерферометров-деформографов, расположенных на Северном Кавказе (Приэльбрусье) и в Крыму (Севастополь), проанализированы собственные колебания Земли, возбужденные одним из сильнейших землетрясений последнего десятилетия (Япония, 2011 г.). Проведено сравнение теоретических (модель PREM) и наблюдаемых мод колебаний (Северный Кавказ).

Ключевые слова: лазерные интерферометры-деформографы, собственные колебания Земли.

Based on the strain data received by means of precision laser interferometers-strainmeters located in Northern Caucasus (Elbrus area) and in the Crimea (Sevastopol), the free oscillations of the Earth (FOS) excited by one of the strongest earthquakes of last decade (Japan, 2011), have been analyzed. The comparison of theoretical (PREM model) and observed FOS modes (Northern Caucasus) were carried out.

Key words: laser interferometers-strainmeters, free oscillations of the Earth.

Сферическая форма Земли существенно ограничивает как радиальные, так и тангенциальные движения внутри планеты. Окружность Земли определяет характерный масштаб длин, которые соответствуют целому числу волн, обеспечивая таким образом существование стоячих колебаний. Поэтому только дискретные значения длин волн и час-

тот могут удовлетворять земным граничным условиям. Соответствующие стоячие волны называются собственными колебаниями Земли (СКЗ) или нормальными модами.

Собственные колебания возбуждаются сильными землетрясениями, сейсмические колебания которых охва-