

УДК 53.087.92 + 681.7.064.64

Повышение точностных параметров лазерных генераторов изображений с круговым сканированием для формирования прецизионных углоизмерительных структур*

**А.В. КИРЬЯНОВ, В.А. ЖМУДЬ, И.Н. ТОМИЛОВ, Д.А. КОТИН, Д.О. ТЕРЕШКИН,
А.В. ОСТАНИН**

В статье рассмотрена концепция построения мехатронного модуля круговых перемещений, используемого в угловой координате лазерного генератора изображений, реализующего принцип кругового сканирования.

Повышение точности формирования прецизионных углоизмерительных структур будет достигаться за счет использования в его конструкции фотоэлектрического преобразователя комбинаторного типа, позволяющего одновременно с измерением угла поворота определять отклонения оси ротора в радиальном направлении.

Ключевые слова: лазерный генератор изображений с круговым сканированием, углоизмерительная структура, фотоэлектрический преобразователь комбинированного типа.

ВВЕДЕНИЕ

Обобщенным термином «Прецизионные углоизмерительные структуры (УИС)» в статье названы элементы типа круговых шкал, растров и многоразрядных кодовых дисков, применяемых в углоизмерительных приборах, в метрологии и геодезии, погрешность изготовления которых $\leq 1.5''$.

При формировании прецизионных УИС решающее значение имеет погрешность позиционирования записывающей головки лазерного генератора изображений, реализующего принцип кругового сканирования (ЛГИ КС) в тангенциальном направлении. Поэтому при разработке мехатронного модуля круговых перемещений для угловой координаты ЛГИ КС, как правило, используют высокоточные аэростатические подшипники и принцип соосного размещения на одном вращающемся роторе заготовки и референтного (опорного) датчика углового положения (ДУП). Считается, что такая конструкция позволяет с наименьшими искажениями переносить все особенности референтного растра на формируемую УИС. Желая повысить точность изделия, стремятся снизить собственную погрешность референтного растра, используя для этого все известные методы, в том числе и метод путевого усреднения, подразумевающий использование в системе считывания ДУП нескольких считывающих головок. Так в одной из последних версий ЛГИ КС модели CLWS-300 в референтном датчике используется четыре считывающих головки, расположенных на позициях 0° , 90° , 180° и 270° [1]. Согласно теории метода [2] это позволяет скомпенсировать влияние всех 2^{n-1} младших гармоник и всех последующих нечетных гармоник, где n – число пар считывающих головок. Следовательно, спектральный состав кривой погрешности изготавливаемых УИС должен быть представлен только четырьмя, восемью, двенадцатью, шестнадцатью и т. д. гармониками. Амплитуды этих гармоник должны принять случайные по абсолютной величине, но вполне устойчивые во времени значения, зависящие от качества изготовления референтного растра.

* Статья получена 25 декабря 2012 г.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1288.

Однако результаты обмера изготовленных на ЛГИ КС оптических УИС показали, что в спектральном составе их погрешности отмечается наличие одновременно двух, трех, четырех и т. д. гармоник, вплоть до 12–16, с заметным преобладанием второй гармоники [3]. Проведенные исследования показали:

1) в референтном датчике формируется сигнал, характеризующий угловое положение, мало зависящий как от неточности изготовления используемого референтного растра, так и от неточностей движения растра в аэростатических подшипниках ротора;

2) возникшая независимость углового положения импульсов референтного сигнала от флюктуаций оси приводит к разрыву жесткой связи через общий вал между референтным датчиком и объектом формирования. В результате сформированная УИС приобретает непрогнозируемые искажения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В базовой модели ЛГИ CLWS-300 использовались ДУП марки ERO-815 фирмы Heidenhain (Германия). Его угловой растр имел 36000 штрихов, что обеспечивало основную разрешающую способность $\Delta\varphi$, равную 36". Фирма гарантировала погрешность изготовления растра $\delta\varphi \leq 2''$. Управляемый делитель, входящий в состав схемы ФАПЧ, обеспечивал умножение частоты в реальном времени на коэффициент K , который может выбираться оператором в диапазоне от 1 до 128. В итоге это повышает разрешающую способность ДУП до 0.28".

Абсолютная величина погрешности формирования топологии оптических элементов в тангенциальном направлении – δ_t , выраженная в мкм и обусловленная наличием погрешности $\Delta\varphi$, может быть представлена как

$$\delta_t = 4.84 \cdot 10^{-6} \cdot r \cdot \Delta\varphi, \quad (1)$$

где r – радиус записи в метрах, $\Delta\varphi$ – погрешность датчика углового положения в угловых секундах. Эта составляющая имеет важное значение при формировании топологии прецизионных УИС и элементов произвольной формы, особенно на больших радиусах. Например, на радиусах записи порядка 100 мм ЛГИ CLWS-300 в тангенциальном направлении позволяет формировать структуры с пространственным разрешением не хуже 0.13 мкм. Это обеспечивается за счет высокой разрешающей способности ДУП. Но в то же время взаимная неопределенность элементов топологии, расположенных на диаметрально противоположных позициях, может достигать 1.0 мкм. По этой причине снижение погрешности углового преобразователя до значений порядка (0.2 – 0.3)" является актуальной задачей для высокоточных ЛГИ КС.

2. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В УГЛОВОМ НАПРАВЛЕНИИ

Погрешность позиционирования в угловом направлении можно существенно уменьшить, если использовать в конструкции угловой координаты ЛГИ КС, фотоэлектрический преобразователь комбинированного типа (ФПКТ). Его устройство показано на рис. 1. Оно содержит радиальный углоизмерительный растр с определенным числом штрихов и меткой нуля 1, считывающую головку 2, кольцевую окружность 3; измерительные головки 4 и 5, блоки усилителей сигналов 6 и 7, блок оцифровки и масштабирования 8, блок формирования текущей угловой координаты 9, блок памяти 10, блок обработки сигналов 11 и блок коррекции результата угловых измерений 12.

Растр 1 совместно с головкой считывания 2 образуют канал измерения угла поворота, построенный по классической схеме инкрементального преобразователя [4]. В состав считывающей головки входят: осветительный блок, состоящий из *светодиода* и *конденсатора*, *индикаторная решетка* и *фотодиоды*. Измерительный растр вместе с индикаторной решеткой образуют так называемое растровое сопряжение, выбирая параметры которого можно получить функцию пропускания заданной формы с требуемым коэффициентом модуляции [5]. В считывающей головке штрихи индикаторных растров нанесены с взаимным сдвигом на 1/4 периода

растра w . Фотоприемники, сопряженные с индикаторными растрами, позволяют формировать выходные квадратурные сигналы, необходимые для определения величины и направления смещения измерительного растра. В блоке 9 происходит формирование текущей угловой координаты. В настоящее время наибольшее распространение получил так называемый арктангенсный алгоритм

$$\theta_i = \arctg \frac{U_{m_i} \sin \theta}{U_{m_i} \cos \theta}, \quad (2)$$

где U_{m_i} – амплитуды синхронных отсчетов выходных квадратурных сигналов считывающей головки. Для интервала $-45^\circ < \theta_i < 45^\circ$ значение функции $\operatorname{tg} \theta_i$ не превышает ± 1 . В этом интервале текущее значение θ_i определяется с наибольшей точностью. На практике точность данного вида алгоритма ограничена нелинейными искажениями формы выходных сигналов считывающих головок преобразователей, их отличием от идеальных гармонических сигналов. С кольцевой окружностью 3 сопряжены дополнительные измерительные головки 4 и 5, установленные со смещением на угол 90° и 180° относительно позиции считывающей головки 2. Эти головки сформированы на основе позиционно-чувствительного элемента, например, трехщелевого приемника [6]. В этих измерительных головках каждая щель приемника смещена относительно соседней на половину собственной ширины. С каждой щелью сопряжен отдельный фотоприемник. Выходные сигналы фотоприемников A , B и C складывают между собой с помощью операционного усилителя в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}} = U_A + U_C - 2U_B, \quad (3)$$

где U_A , U_B и U_C – выходные сигналы фотоприемников A , B и C соответственно. Когда граница окружности 3 находится точно посередине окна B , суммарный сигнал $U_{\text{вых}}$ равен нулю.

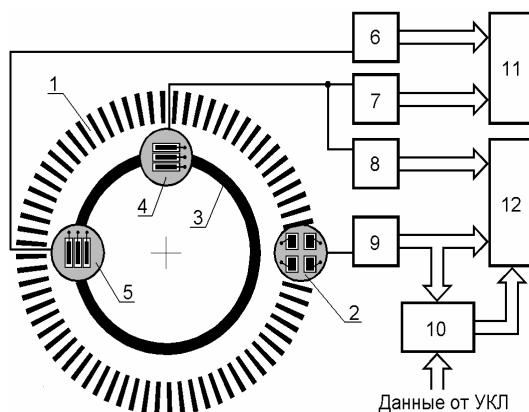


Рис. 1. Устройство фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа

Выходные сигналы измерительных головок 4 и 5 могут быть использованы двояко.

1. Выходной сигнал с головки 4 используется для повышения точности позиционирования в угловом положении. Полученное в блоке 9 значение θ_i отличается от истинного углового смещения на величину $\frac{2\pi}{w}(e_i \sin \Phi + \delta_i)$, состоящую из двух компонент: $\frac{2\pi}{w} e_i \sin \Phi$ – составляющей от неточной установки растра на вал и $\frac{2\pi}{w} \delta_i$ – составляющей от биений аэростатиче-

ского подшипника мехатронного модуля. Для определения величины этих искажений производят измерения линейного смещения раstra 1 в тангенциальном направлении, которое осуществляют с помощью головки 4. Выходной сигнал этой головки оцифровывается в блоке 8 и путем деления его на среднее значение радиуса измерительного раstra переводится в текущее значение угловой поправки, обусловленной пространственной нестабильностью положения растр относительно оси вращения вала. В блоке коррекции 12 производится коррекция результатов измерений, поступивших с выхода блока 9, путем учета данных, поступивших из блока памяти 10, в котором хранятся данные об угловой погрешности измерительного раstra, полученные, например, на установке АС-700 [7], и данных, поступивших с выхода блока 8.

2. Измерительные головки 4 и 5, блоки усилителей сигналов 6 и 7, а также блок обработки информации 11 используются для измерения биения оси вращения ротора мехатронного модуля ЛГИ КС и проведения высокоточной динамической балансировки. В этом случае сигналы с этих головок можно рассматривать как $x(t)$ и $y(t)$ – координаты ротора. Поскольку модуль дисбаланса пропорционален амплитуде колебаний, то величина $\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}$ пропорциональна модулю дисбаланса. Как уже указывалось ранее в состав считывающей головки 2 входит «метка нуля», которая связывает неподвижную систему координат с системой вращающейся вместе со шпинделем. В момент прохождения «нуля» величина $\arctan \frac{y(t)}{x(t)}$ есть угол дисбаланса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение точности позиционирования ЛГИ КС в угловом направлении до значений, предъявляемых к прецизионным УИС, может быть достигнуто путем использования высокоточного углового преобразователя и проведения качественной динамической балансировки ротора мехатронного модуля. Для этого целесообразно использовать в конструкции ЛГИ КС фотоэлектрический преобразователь комбинированного типа, обеспечивающий одновременно с высокоточным измерением угла поворота ротора мехатронного модуля измерение его текущих отклонений в радиальном направлении. Предложен метод и структура преобразователя данного типа для решения поставленной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Кириянов В.П.** Экспериментальная оценка класса точности прецизионного углового преобразователя встраиваемого типа / В.П. Кириянов, А.В. Кириянов, И.Ф. Клисторин // Датчики и системы. – 2009. – № 1. – С. 11–14.
- [2] **Ионак В.Ф.** Приборы кинематического контроля / В.Ф. Ионак. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
- [3] **Kiryaynov A.V.** Forming high-precision angular measuring structures by the laser pattern generators with circular scanning / A.V. Kiryanov, V.P. Kiryanov, S.A. Kokarev, V.G. Nikitin, V.M. Vedernikov // Measurement Science Review. – 2006. – Vol. 6. – Section 3. – № 1. – P. 10–13.
- [4] **Angular encoders:** General Catalog / Heidenhain GmbH. – Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2000. – 82 p.
- [5] **Преснухин Л.Н.** Фотоэлектрические преобразователи информации / Л.Н. Преснухин, С.А. Майоров, И.В. Меськин, В.Ф. Шаньгин; под ред. Л.Н. Преснухина. – М.: Машиностроение, 1974. – 376 с.
- [6] **Savabe M.** Development of the Vacuum Interferometric Comparator for Calibrating the Fine Linear Encoders and Scales / M. Savabe, F. Maeda, Y. Yamaryo, T. Shimomura, H. Saruki, S. Aoyagi // 7-th International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry and Everyday Life. Proceedings of SPIE. – Vol. 4900. – P. 282–289.
- [7] **Кириянов В.П.** Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений / В.П. Кириянов, А.В. Кириянов, Д.Ю. Кручинин, О.Б. Яковлев // Оптический журнал. – 2007. – № 12. – С. 40–49.

Кириянов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета, научный сотрудник лаборатории лазерных прецизионных систем Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН. Основное направление научных исследований – лазерные генераторы изображений, фотоэлектрические угловые преобразователи, мехатроника. Имеет более 40 публикаций. E-mail: alexey@tdisie.nsc.ru.

Жмудь Вадим Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерные системы, управляющие системы, автоматика. Имеет более 140 публикаций. E-mail: oao_nips@bk.ru.

Томилов Иван Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – спецификация и исследование гибридных схем. Имеет более 30 публикаций. E-mail: studnstu@ngs.ru.

Котин Денис Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры ЭАПУ Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – автоматическое управление электроприводами. Имеет более 15 публикаций. E-mail: ni_Kotin@mail.ru.

Терешкин Денис Олегович, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управляющие системы, автоматика. E-mail: todin.dirihle@gmail.com.

Останин Александр Валерьевич, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управляющие системы, автоматика. E-mail: neodim@ngs.ru.

A.V. Kiryanov, V.A. Zhmud I.N. Tomilov, D.A. Kotin, D.O. Tereshkin, A.V. Ostanin

Accuracy enhancement of circular laser pattern generator for precision angle measurement structures

The paper proposes the concept of construction of mechatronic module of circular movements which is used in the angular coordinate of the laser image generator that implements the principle of circular scan.

Increasing of the accuracy of precision angle measuring structures forming will be achieved with the use in its construction of the combinatorial type of photoelectric converter, allowing simultaneously with the measurement of angle of rotation to determine the deviations of the rotor axis in the radial direction.

Key words: circular laser pattern generator, angler measurement structures, hybrid photoelectric encoder.