

Оптический журнал

Оптическое приборостроение и метрология
Optical instrument making and metrology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-12-85-95

УДК 53.087.92 + 681.7.064.64

Эффективность использования метода компенсации для синтеза прецизионных утоизмерительных структур

АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ Кирьянов[✉]

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

alexey@iae.nsk.su <https://orcid.org/0000-0002-1239-2262>

Аннотация

Предмет исследования. Использование метода компенсации инструментальной составляющей погрешности преобразования при формировании оптических утоизмерительных структур. **Цель работы.** Повышение точности формирования оптических утоизмерительных структур (штриховых лимбов, круговых шкал, растров, кодовых дисков) с помощью лазерных генераторов изображений, работающих в полярной системе координат. **Основные результаты.** Представлены результаты модернизации высокоточного мехатронного модуля круговых перемещений, входящего в систему угловой координаты CLWS-300. Показано, что при использовании метода компенсации инструментальной составляющей погрешности преобразования точность синтеза структур может достигать значения $\pm 1,0''$ на диаметре 70 мм. Использование в мехатронном модуле круговых перемещений метода компенсации позволяет упростить его конструкцию и повысить точность формируемых структур экономически более привлекательным способом. В тоже время эффективность данного метода ограничена остаточным дисбалансом ротора аэростатического подшипника, который заметно искажает траекторию движения ротора. **Практическая значимость.** Повышение метрологических характеристик измерительных приборов гониометрического типа, в отсчетных системах которых используются утоизмерительные структуры, изготовленные с помощью лазерных генераторов изображений.

Ключевые слова: оптическая утоизмерительная структура, угловая погрешность, датчик угловых перемещений, лазерный генератор изображений, утоизмерительная машина, метод компенсации

Благодарность: исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 121042900050-6).

Ссылка для цитирования: Кирьянов А.В. Эффективность использования метода компенсации для синтеза прецизионных утоизмерительных структур // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 12. С. 85–95. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-85-95>

Коды OCIS: 230.4000, 280.4788, 230.0250, 230.0040.

Efficiency of using the compensation method for synthesizing precision angle-measuring structures

ALEXEY V. KIRYANOV[✉]

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

alexey@iae.nsk.su <https://orcid.org/0000-0002-1239-2262>

Abstract

Subject of study. The use of compensation method of the instrumental component of the conversion error in the formation of optical angle-measuring structures. **Aim of study.** Increasing the accuracy of formation of optical angle-measuring structures (bar limbs, circular scales, rasters, code disks) using polar coordinate laser pattern generators. **Main results.** The results of modernization of a high-precision mechatronic circular motion module included in the CLWS-300 angular coordinate system are presented. It is shown that when using the method of compensation of the instrumental component of the transformation error, the accuracy of the structure synthesis can reach the value of $\pm 1.0''$ at a diameter of 70 mm. The use of the compensation method in the circular motion mechatronic module allows to simplify its design and increase the accuracy of the formed structures in an economically more attractive way. **Practical significance.** The increase of metrological characteristics of goniometric measuring devices, in the reference systems of which the angular measuring structures made up with the help of laser image generators are used.

Keywords: optical angle-measuring structure, angular error, angular encoder, laser pattern generator, angle-measuring machine, compensation method

Acknowledgment: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state registration No. 121042900050-6).

For citation: Kiryanov A.V. Efficiency of using the compensation method for synthesizing precision angle-measuring structures [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 12. P. 85–95. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-85-95>

OCIS codes: 230.4000, 280.4788, 230.0250, 230.0040.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические уголизмерительные структуры (ОУС) (далее в тексте статьи под этим сокращением понимаются круговые растры, шкалы, многоразрядные кодовые лимбы) используются в качестве основного метрологического элемента в измерительных приборах гониометрического типа (теодолитах, гониометрах, датчиках угловых перемещений и т.д.).

Наиболее часто процесс изготовления ОУС содержит два технологических этапа: изготовления эталонного фотошаблона, содержащего топологию измерительной структуры, и этапа тиражирования, в результате которого получают рабочие копии. Как правило, точность рабочих копий ниже точности эталонного фотошаблона. По этой причине, изготовление эталонных образцов ОУС с максимально высокой точностью является важнейшей зада-

чей технологического процесса изготовления прецизионных приборов гониометрического типа.

Для этого при формировании ОУС по технологии кругового сканирования, используют соосное размещение на роторе аэростатического подшипника опорного датчика угловых перемещений (ДУП) и оптической заготовки будущей структуры. Считается, что такая компоновка позволяет с наименьшими искажениями переносить все особенности этого датчика на формируемую структуру. Таким образом, желая повысить точность изготовления ОУС, стремятся повысить точность опорного ДУП, используя для этого различные методы. В настоящее время наиболее известными приёмаами повышения точности ДУП являются метод фильтрации в различных вариантах реализации [1–3] и метод компенсации [4].

Под термином «метод фильтрации» понимается набор технических (конструктивных) средств и алгоритмов обработки информации, объединённых в составе ДУП в различного рода фильтры (пропускающего или режекторного типов) [5] с целью автоматического подавления (полностью или частично) искажающих факторов, ответственных за снижение точности датчика. Особенности такого объединения технических средств частично нашли отражение в названиях методов реализации режима автокалибровки. Широко известен, например, метод многоголовочной регистрации данных (МРД-метод) [1] или ещё иначе называемый как метод путевого усреднения [6]. Также широко известен метод усреднения при равном делении (Equal Division Average method: EDA-method) [7]. В последние годы появились новые модернизированные варианты указанных методов [8].

Под термином «метод компенсации» понимается набор технических (конструктивных) средств и процедур, основанных на физическом выявлении искажающих факторов, ответственных за снижение точности ДУП, и их подавлении полностью или частично с целью обеспечения в конечном результате более высокой точности измерений [4]. Чаще всего, данный метод используется в экспериментальной практике, когда происходит отработка той или иной методики (алгоритма) контроля конкретного параметра.

Обзор научно-технической литературы показывает, что применение МРД-метода фильтрации позволяет значительно снизить результирующую погрешность ДУП. Положительный эффект достигается за счёт того, что определённый набор считывающих головок (СГ) в угловом датчике позволяет выделить и пропустить на выход характерные для него гармоники искажающей функции, при этом остальные гармоники максимально подавляются [9–11]. Указанное свойство наборов СГ подавлять искажающий вклад целого набора гармоник и получило название автокалибровки. Результат повышения точности преобразования существенно зависит от числа используемых СГ. В [6] показано, что равномерное расположение по образующей измерительного растра n СГ позволяет скомпенсировать влияние 2^{n-1} младших и всех последующих кратных им гармоник искажающей функции в угловом

датчике. Таким образом, в ДУП формируется выходной сигнал, характеризующий угол поворота, слабо зависящий от точности изготовления ОУС, на базе которой создан датчик, и от паразитных движений ротора в подшипниковом узле.

Так, немецкие специалисты при создании измерительной системы использовали восемь СГ, что позволило им уменьшить погрешность такой системы до $\pm 0,01''$. Такой случай рассматривается ими в [12, 13] применительно к измерительным системам угловых компараторов (УК) моделей WMT-220, созданного фирмой Heidenhain (Германия), и WMT-905, созданного в Национальном метрологическом институте Германии (РТВ) и используемого в качестве национального эталона единицы плоского угла.

Таким образом, использование МРД-метода фильтрации позволяет создавать на его основе высокоточные ДУП, хотя это и приводит к достаточно серьёзному усложнению конструкции датчика при использовании большого числа СГ и необходимости использовать измерительные растры большого диаметра для размещения вдоль их образующих необходимого количества СГ. Однако анализ технической литературы, посвящённой описанию выпускаемых различными производителями ДУП промышленного применения, показал, что в структуре подобных изделий задействовано не более 2-х или 4-х СГ. Дальнейшее увеличение их числа с целью повышения точности датчика при сохранении габаритных размеров в стандартных значениях (как правило, диаметром до 200 мм) среди производителей считается технически трудно реализуемым и экономически нецелесообразным. По этой причине для повышения точности ДУП многие разработчики пытаются применять экономически более привлекательные методы. К таким относится метод компенсации.

Наиболее известной реализацией данного метода компенсации инструментальной составляющей погрешности преобразования в ДУП является версия, когда у готового датчика с помощью специальной уголизмерительной машины (УИМ) или углового компаратора (УК) выявляют кривую погрешности преобразования (калибровочную кривую). Затем файл данных с мгновенными значениями этой функции запоминают в блоке памяти процес-

сора контролируемого ДУП для последующего использования в процедурах коррекции текущих результатов измерений. Естественно, что считываемые из блока памяти процессора ДУП данные жёстко синхронизируются с результатами текущих измерений с помощью метки нуля (метка начала оборота).

В статье на примере модернизации угловой координаты лазерного генератора изображений, работающего в полярной системе координат, показаны результаты использования метода компенсации инструментальной составляющей погрешности преобразования при синтезе прецизионных углоизмерительных структур.

1. МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ В ДУП С ОДНОЙ СЧИТЫВАЮЩЕЙ ГОЛОВКОЙ

Максимальное упрощение конструкции ДУП достигается при использовании только одной СГ. Возможности подобного подхода можно рассмотреть на примере ДУП модели ROD-280 фирмы Heidenhain (Германия), в котором реализован данный приём. В конструкции данного ДУП используются одна СГ и прецизионные шпиндельные подшипники, которые имеют радиальное биение внутренних колец в пределах 1,5 мкм. Величину установочного эксцентризитета ОУС датчика на ротор и его биений в подшипниках при вращении в линейных величинах можно оценить, как $\Delta_R = (1,5-2,5)$ мкм. Согласно [14] при среднем радиусе измерительного раstra, равным $R_{av} = 30$ мм, совместное возмущающее действие указанных факторов в угловых величинах будет лежать в диапазоне $\pm(10,3-17,2)''$. Оценка погрешности формирования топологии ОУС датчика данного радиуса по технологии Diadur показывает, что она не превышает значения $\delta_r = \pm 2,0''$ [15]. Совместное действие этих источников возмущений, оцениваемое по закону сложения случайных величин, приводит к появлению погрешности преобразования порядка $\delta = \pm(10,5-17,3)''$. Эту составляющую погрешности измеряют с помощью УИМ или УК, запоминают в оперативной памяти процессора ДУП и компенсируют в ходе последующих измерений. Конечный результат выполнения данной процедуры находит отображение в паспорте на данное изделие, в котором фирма-изготовитель приводит значение по-

грешности ДУП данного типа. Например, для данного конкретного датчика оно равно $\pm 1,7''$. Этот показатель на порядок меньше, чем приведённые выше оценочные значения погрешности. Это говорит о том, что метод компенсации реально позволяет существенно поднять точность измерений.

Оставшееся нескомпенсированным значение погрешности является следствием действия случайной составляющей погрешности, вносимой биениями подшипников, прежде всего, их несинхронной составляющей, оцениваемой на уровне в 0,25 мкм. Полученный результат достаточно хорошо согласуется со значениями σ , характеризующими несинхронную составляющую биений прецизионных малогабаритных подшипников [16]. Следовательно, метод компенсации позволяет повысить точность почти на порядок, но его предельные возможности ограничены уровнем случайных биений подшипников.

2. МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ В МНОГОГОЛОВОЧНОМ ВАРИАНТЕ ИСПОЛНЕНИЯ ДУП

Полученные выводы оказались справедливы не только для одноголовочных ДУП, но для вариантов датчиков с 2-мя или 4-мя СГ, реализующих МРД-метод фильтрации. В своё время, специалисты фирмы Heidenhain (Германия) с помощью разработанного ими УК модели WMT-220 произвели калибровку одного из своих наиболее точных ДУП модели RON-905. Погрешность данной модели датчика действительно оказалась достаточно малой и гарантированно укладывалась между значениями $\pm 0,4''$ [14]. Чтобы ещё более повысить точность этого прибора ими был разработан специализированный интерфейсный блок AWE-1024. На данное устройство возлагались функции нормализации выходных квадратур датчика, интерполяции с программируемым коэффициентом умножения и выполнение процедуры коррекции текущих результатов измерения с учётом полученных с помощью WMT-220 для этого ДУП значений погрешности, вносимых самим датчиком. С помощью данного модуля разрешающая способность ДУП была увеличена пропорционально коэффициенту интерполяции, равному 1024, и доведена до $0,035''$. Погрешность преобразова-

ния также была снижена, но до уровня $\pm 0,2''$, то есть в два раза. Такая разница в достигнутых показателях совсем не случайна. Дело в том, что, как это указывалось выше, используемый алгоритм компенсации изначально предназначен для подавления систематических составляющих погрешности. Он малоэффективен по отношению к случайным составляющим погрешности измерений.

В начале 2000 годов на ряд отечественных предприятий оптико-механической промышленности, занимающихся выпуском прецизионного гониометрического оборудования, было поставлено несколько лазерных генераторов изображений модели CLWS-300 (ЛГИ КС), разработанных Институтом автоматики и электрометрии СО РАН совместно с Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН [17, 18]. Данное оборудование было ориентировано на выпуск широкой гаммы ОУС, применяемых в отсчётных системах прецизионного гониометрического оборудования. Использование этого технологического оборудования позволило провести коренную модернизацию делительного производства ряда предприятий на основе современных лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий.

Однако к настоящему времени становится очевидным, что основные метрологические характеристики (угловое разрешение и точность) данного оборудования начинают отставать от новых разнообразных требований, предъявляемых сегодня к элементам фотоники и микросистемной техники. Поэтому были проведены исследования по поиску путей повышения метрологических характеристик ЛГИ КС модели CLWS-300. Важнейшей составной частью лазерного генератора изображений является высокоточный мехатронный модуль круговых перемещений, входящий в систему угловой координаты CLWS-300. Данный узел разработан на базе аэростатического подшипника (АП) с вертикальной осью вращения, используемого для кругового сканирования заготовки с фоточувствительным материалом, датчика угловых перемещений и двигателя вращения. Следует особо отметить, что у измерительно-технологических установок, в составе которых присутствуют подобные мехатронные модули круговых перемещений, присутствует специфическая по-

грешность — погрешность позиционирования в угловом направлении.

Основными источниками данной погрешности являются ограниченная точность опорного ДУП, входящего в состав мехатронного модуля, и неидеальность изготовления АП, на базе которого этот модуль создан. Для достижения высокой точности и разрешающей способности в мехатронном модуле используются многоголовочные фотоэлектрические (оптоэлектронные) ДУП. Такой выбор объясняется тем, что эти датчики дают возможность обеспечить погрешность преобразования порядка десятых и сотых долей угловой секунды. Требуемое угловое разрешение для системы управления ЛГИ КС достигается за счёт совместного использования ДУП с умножителем частоты следования импульсов, созданного на основе схем с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ).

В первых образцах лазерных генераторов изображений CLWS-300 в угловой координате использовались датчики немецкой фирмы Heidenhain модели ERO-815 с 2-мя СГ, установленные через 180° . Согласно МРД-методу фильтрации, такое расположение СГ позволяет исключить ошибку от установочного эксцентрикитета ОУС (1-ю гармонику) при монтаже датчика на объект управления. Измерительный растр ДУП имел следующие параметры:

- средний радиус штрихов — $R_{av} = 82,5$ мм;
- количество штрихов раstra — $N = 36000$;
- период штрихов раstra — $w = 14,0$ мкм;
- погрешность изготовления раstra — $\Delta\varphi \leq \pm 2,0''$.

Указанные параметры ДУП обеспечивали ему основную разрешающую способность $\Delta\varphi = 36''$. Дальнейшее увеличение разрешающей способности (т.е. дополнительная разрешающая способность ДУП) достигалось за счёт использования управляемого делителя, входящего в состав ФАПЧ. Данное устройство позволяло обеспечить умножение частоты в реальном времени на коэффициент $K = 1\text{--}128$ в зависимости от выбора оператора установки. Таким образом, итоговая разрешающая способность ДУП увеличивалась до значения $0,28''$.

Абсолютная величина погрешности формирования топологии элемента в тангенциальном направлении δ_t , выраженная в мкм

и обусловленная наличием погрешности $\Delta\phi$, может быть представлена как

$$\delta_1 = \frac{\pi}{180^\circ \cdot 60 \times 60} r \Delta\phi = 4,84 \times 10^{-6} r \Delta\phi,$$

где r — радиус записи в метрах, $\Delta\phi$ — погрешность ДУП в угловых секундах. Эту погрешность необходимо учитывать при синтезе топологии высокоточных ОУС, а также дифракционных оптических элементов. Так, при записи оптического элемента на радиусе $R = 100$ мм за счёт угловой разрешающей способности опорного ДУП, равной $0,28''$, пространственное разрешение положения лазерного луча на поверхности заготовки в тангенциальном направлении, получается на уровне $0,13$ мкм. Но, в то же время, взаимная неопределённость элементов топологии, расположенных на диаметрально противоположных позициях, обусловленная погрешностью ДУП, может достигать $1,0$ мкм.

В ходе выполнения работ по повышению метрологических характеристик лазерного генератора модели CLWS-300 был экспериментально исследован метод компенсации в многоголовочном варианте исполнения опорного ДУП лазерного генератора изображений. Для этого был разработан специализированный измерительный стенд, реализующий метод кросс-калибровки [19]. Данный метод известен также как фазостатистический метод (ФСМ) [20] или как метод Хэвелинка [21].

Компенсация систематической погрешности измерительного растра опорного ДУП с помощью данного метода основана на следующем известном постулате — сумма погрешностей делений круговой шкалы $\Delta\phi$ равна нулю.

$$\sum_1^m \Delta\phi_i = 0,$$

Суть такого метода калибровки состоит в организации серии из m измерений (сличений), в результате которых считывается некоторая последовательность файлов данных о взаимном расположении штрихов в проверяемом и эталонном растрах при их различных ориентациях друг относительно друга [22]. Каждый файл содержит n элементов, где n — число контролируемых штрихов растра. Полученные данные должны быть «привязаны» к началу

отсчёта одного из растров. В результате регистрации измеренных данных в памяти управляющего компьютера образуется матрица размерности $m \times n$. Затем в каждом столбце полученной матрицы производится построчное сложение и усреднение измеренных данных. Если данные «привязаны» к началу вращения проверяемого растра, то в каждом i -м столбце матрицы формируется следующий результат, характеризующий отклонение i -го штриха проверяемого растра относительно его идеального положения:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_i &= \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \left(\Delta\phi_{\text{ref}}_{i+j \frac{n}{m}} + \Delta\phi_{\text{mes}_i} \right) = \\ &= \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \Delta\phi_{\text{ref}}_{i+j \frac{n}{m}} + \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \Delta\phi_{\text{mes}_i} = \\ &= \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \Delta\phi_{\text{ref}}_{i+j \frac{n}{m}} + \frac{1}{m} (m \Delta_{\text{mes}_i}), \end{aligned}$$

где $i = (1, \dots, n)$ — текущий номер штриха шкалы, к началу оборота которой «привязаны» данные, $j = (1, \dots, m)$ — текущий номер сдвига по фазе взаимного расположения шкал, $i + jn/m$ — текущий номер штриха второй шкалы, который сравнивается с i -м штрихом

первой шкалы, $1/m \sum_{j=0}^{m-1} \Delta\phi_{\text{ref}_{i+jn/m}}$ — остаточный

вклад шкалы эталонного датчика. В [23] было показано, что при использовании в качестве референтного ДУП модели ROD-800 фирмы Heidenhain (Германия) и организации шага смещения, равного 20° , что обеспечивало $m = 18$, (то есть 18 сдвигов одной шкалы относительно другой в пределах полного оборота), искающий вклад референтного датчика в результат калибровки будет не более $0,1''$.

Эффективность использования метода компенсации в многоголовочном варианте исполнения ДУП оценивалась в ходе выполнения натурного эксперимента, состоящего из 2-х этапов. На первом этапе в системе автоматизированного проектирования AutoCAD была подготовлена топология контрольной ОУС, которая содержала два радиальных растра с одинаковыми параметрами (число штрихов $N = 6000$, высота штрихов — 3 мм, скважность — 0,5). При этом первый растр

располагался на радиусе $R_{av} = 43,5$ мм, а второй — $R_{av} = 35,5$ мм.

На втором этапе на установке CLWS-300 за одну технологическую операцию на одной подложке были синтезированы топологии 2-х измерительных растров. При этом первая дорожка фотошаблона была записана без введения компенсации погрешности опорного ДУП, а другая — с компенсацией. Режим компенсации выполнялся следующим образом. После снятия кривой погрешности опорного ДУП на основе метода кросс-калибровки данные значения вычитались из расчётных значений координат границ штрихов, подготовленных управляющей программой ЛГИ КС. Для этого в системе управления угловой координаты лазерного генератора был выделен специальный блок памяти, в который был записан файл данных о снятой кривой погрешности опорного ДУП. Данные из этого блока считывались в соответствии с текущей угловой координатой ротора угловой координаты.

Метрологические характеристики синтезированных структур оценивались с помощью специализированной углоизмерительной машины (УИМ) модели АЭ.1686, ориентированной для работы с ОУС [24]. На рис. 1а показана кривая погрешности опорного ДУП лазерного генератора, полученная по результатам калибровки с помощью измерительного стенда, разработанного для фиксации калибровочной кривой и реализующего метод

кросс-калибровки [23]. С учётом центрирования погрешность ДУП оценивается как $\pm 2,8''$. На рис. 1б представлена кривая погрешности углового положения штрихов растра, записанных на верхней дорожке фотошаблона без введения коррекции. Анализируя график кривой результирующей погрешности данного растра можно сделать вывод, что в случае синтеза структуры без введения коррекции её метрологические характеристики ($\delta = \pm 3,5''$) и форма достаточно хорошо коррелируют с параметрами опорного датчика ЛГИ КС.

Таким образом, данные измерения подтверждают высказанный ранее тезис о том, что соосное размещение опорного ДУП и синтезируемой структуры позволяет с высокой точностью воспроизводить элементы топологии структур (по крайней мере, в узловых точках записываемой ОУС, угловые координаты которых совпадают с угловыми координатами штрихов растра ДУП).

Совсем иной результат получается при синтезе топологии ОУС с введением коррекции. Во-первых, полностью изменилась форма кривой результирующей погрешности. Во-вторых, существенно уменьшились пределы изменения погрешности синтеза топологии ОУС. На рис. 2 для наглядности приведены совмещённые вместе графики результирующей погрешности ОУС с введением (кривая 1) и без введения коррекции (кривая 2).

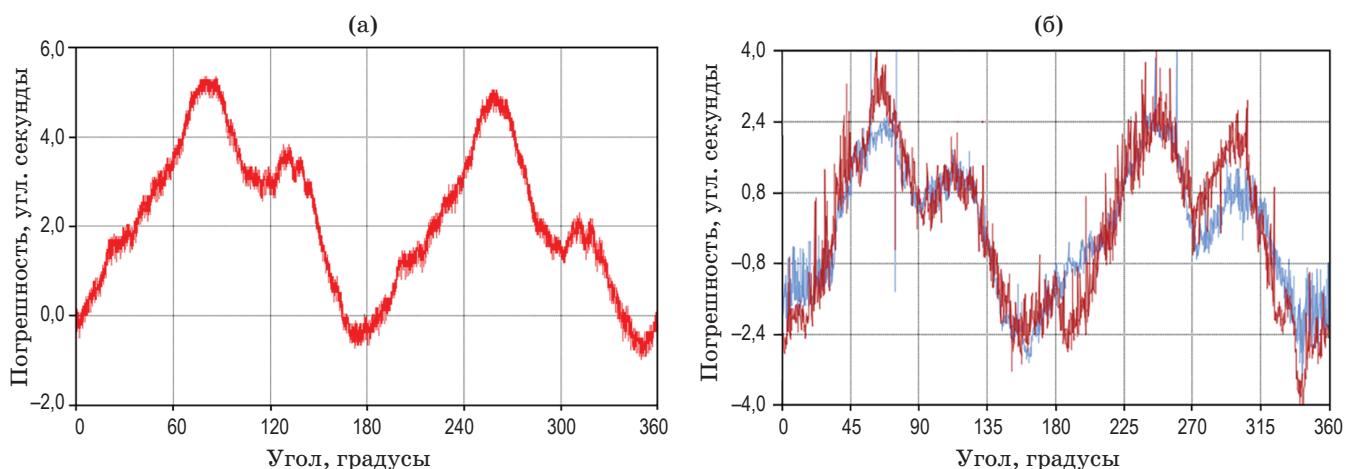


Рис. 1. Влияние опорного датчика на точность синтеза структур. (а) Погрешность датчика с 2-мя СГ, (б) погрешность синтезируемой структуры

Fig. 1. Influence of the reference sensor on the accuracy of structure synthesis. (a) Accuracy of encoder with two readheads (RH), (b) the error of the synthesized structure

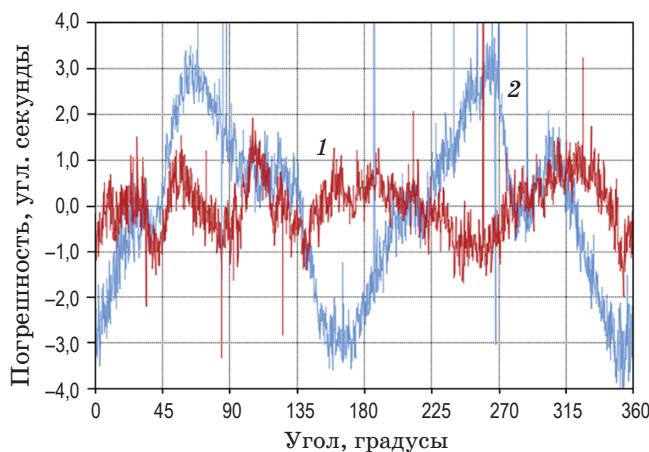


Рис. 2. Графики результирующей погрешности с введением (кривая 1) и без введения коррекции (кривая 2)

Fig. 2. Diagrams of the resulting error with (curve 1) and without correction (curve 2)

Из приведённых графиков следует, что при использовании в опорном ДУП 2-х СГ, расположенных через 180° и файла коррекции систематической погрешности, результирующая погрешность синтеза структур может быть снижена до уровня $\pm 1,0''$. Таким образом, можно констатировать, что точность синтеза структур при введении коррекции повышается в 3,5 раза по сравнению с обычным режимом записи.

Источников оставшейся нескомпенсированной погрешности может быть несколько:

1. Действие случайной составляющей погрешности, вносимой биениями АП, прежде всего, его несинхронной составляющей. Как известно, биения, изменяющиеся от оборота к обороту и являющиеся асинхронными с вращением, получили название N.R.R.O (Non-Repetitive Run-Out) [16]. При получении файла калибровки ДУП в блоке памяти запоминается *i*-ая реализация составляющей погрешности, вносимой биениями АП. Но вклад биений подшипника в момент измерения угла поворота ротора ЛГИ КС будет отличаться от тех значений, которые были записаны в блок памяти. При выполнении операции коррекции эти случайные реализации сложатся по закону случайных чисел.

2. Действие паразитных движений типа прецессии и нутации. При анализе полученных результатов необходимо принимать во внимание, что АП генератора изображений работает на низких (дорезонансных) скоростях

вращения. В этом случае ротор АП вращается вокруг центра симметрии подшипника и на стабильность его траектории движения серьёзное влияние оказывает остаточный дисбаланс ротора, который порождает силы Кориолиса. Возникающие при этом паразитные движения (прецессия и нутация) заметно искажают траекторию движения точек поверхности ротора. Причём форма траекторий существенно зависит от текущего радиуса сканирования поверхности планшайбы ротора [25]. Так как в ЛГИ КС процесс записи структур идёт непрерывно, то наличие паразитных движений апекса ротора на каждом обороте непосредственно влияет на качество записываемых структур.

3. Действие компенсационной муфты, используемой в ходе измерений. В измерительном стенде для связи объекта калибровки и эталонного датчика угловых перемещений используется компенсационная муфта, которая позволяет уменьшить требования при сопряжении объектов (смещения, наклоны и несоосности валов и т.д.). Основными качественными характеристиками муфт является кинематическая погрешность (погрешность передачи вращения с одного вала на другой), мёртвый ход и неравномерность углового движения [26]. Из-за наличия этих погрешностей муфта будет вносить заметный искажающий вклад в погрешность контролируемого ДУП. Основной недостаток существующих методов контроля погрешностей муфт связан с отсутствием возможности оценки её влияния на результат измерения погрешностей ДУП в режиме реального времени [26].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально проверена эффективность использования в опорном ДУП лазерного генератора изображений, работающего в полярной системе координат, метода компенсации инструментальной составляющей погрешности преобразования. Показано, что погрешность синтеза структур при введении коррекции уменьшается в 3,5 раза по сравнению с обычным режимом записи и позволяет изготавливать структуры с погрешностью $\pm 1,0''$ на диаметре 70 мм. Использование в мехатронном модуле круговых перемещений метода компенсации позволяет упростить его конструкцию и повысить точность формируемых

структур экономически более привлекательным способом. В тоже время эффективность данного метода ограничена остаточным дисбалансом ротора АП, который заметно искажает траекторию движения точек поверхности ротора, так как вклад биений подшипника в момент измерения угла поворота будет отличаться от тех значений, которые были записаны в блок памяти.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang R., Bao W., Zhao H., Jia H., Liandong L. Self-calibration method of precision shafting angle measurement error based on multiple reading heads // Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation. Proc. SPIE. 2019. V. 11053. P. 1105328. <https://doi.org/10.1117/12.2511826>
2. Jiao Y., Dong Z., Ding Y., Liu P. Optimal arrangements of scanning heads for self-calibration of angle encoders // Measurement Science and Technology. 2018. V. 28. P. 105013 (11pp). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa8545>
3. Ishii N., Taniguchi K., Yamazaki K. Aoyama H. Development of super-accurate angular encoder system with multi-detecting heads using VEDA method // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2018. V. 12. № 5. P. 1–13. <https://doi.org/10.1299/jamds.2018jamds0106>
4. Nowak W., Carolan K., Furst M., Lacayo O. Rotary encoder error compensation system and method for photoreceptor surface motion sensing and control // US Patent 6 304 825 B1. 1999. Publ. Oct. 2001.
5. Кирьянов А.В., Кирьянов В.П. Применение согласованных комплементарных фильтров в гониометрии // Автометрия. 2021. Т. 57. № 6. С. 49–59. <https://doi.org/10.15372/AUT20210605>
6. Ионак В.Ф. Приборы кинематического контроля. М.: Машиностроение, 1981. 128 с.
7. Masuda T., Watanabe T., Beeks K. et al. Absolute X-ray energy measurement using a high-accuracy angle encoder // Journal of synchrotron radiation. 2021. V. 28. № 1. P. 111–119. <https://doi.org/10.1107/S1600577520014526>
8. Hsieh T.-H., Watanabe T., Hsu P-E. Calibration of rotary encoders using a shift-angle method // Applied Sciences. 2022. V. 12. № 10. P. 5008. <https://doi.org/10.3390/app12105008>
9. Watanabe T., Fujimoto H., Nakayama K., Masuda T., Kajitani M. Automatic high-precision calibration system for angle encoder // SPIE Proceedings. 2001. V. 4401. P. 267. <https://doi.org/10.1117/12.445630>
10. Watanabe T., Fujimoto H., Masuda T. Self-calibratable rotary encoder // Journal of Physics: Conference Series. 2005. V. 13. № 13. P. 240–245. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/13/1/056>
11. Watanabe T., Kon M., Nabeshima N., Taniguchi K. An angle encoder for super-high resolution and super-high accuracy using SelfA // Measurement Science and Technology. 2014. V. 25. № 6. P. 065002. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/25/6/065002>
12. Probst R., Wittekopf R., Krause M., Dangschat H., Ernst A. The new PTB angle comparator // Measure-

Таким образом, можно констатировать, что наиболее предпочтительными конструкциями опорного ДУП лазерного генератора изображений, работающего в полярной системе координат, являются такие, которые позволяют в режиме реального времени компенсировать случайные биения ротора АП. К таким методам относятся методы фильтрации и активной компенсации.

REFERENCES

1. Zhang R., Bao W., Zhao H., Jia H., Liandong L. Self-calibration method of precision shafting angle measurement error based on multiple reading heads // Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation. Proc. SPIE. 2019. V. 11053. P. 1105328. <https://doi.org/10.1117/12.2511826>
2. Jiao Y., Dong Z., Ding Y., Liu P. Optimal arrangements of scanning heads for self-calibration of angle encoders // Measurement Science and Technology. 2018. V. 28. P. 105013 (11pp). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa8545>
3. Ishii N., Taniguchi K., Yamazaki K. Aoyama H. Development of super-accurate нц angular encoder system with multi-detecting heads using VEDA method // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2018. V. 12. № 5. P. 1–13. <https://doi.org/10.1299/jamds.2018jamds0106>
4. Nowak W., Carolan K., Furst M., Lacayo O. Rotary encoder error compensation system and method for photoreceptor surface motion sensing and control // US Patent 6 304 825 B1. 1999. Publ. Oct. 2001.
5. Kiryanov A.V., Kiryanov V.P. Application of coherent lattice filters in goniometry // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2021. V. 57. № 6. P. 601–610. <https://doi.org/10.3103/S8756699021060066>
6. Ionak V.F. Kinematic control devices. M.: Mechanical engineering, 1981. P. 128.
7. Masuda T., Watanabe T., Beeks K. et al. Absolute X-ray energy measurement using a high-accuracy angle encoder // Journal of synchrotron radiation. 2021. V. 28. № 1. P. 111–119. <https://doi.org/10.1107/S1600577520014526>
8. Hsieh T.-H., Watanabe T., Hsu P-E. Calibration of rotary encoders using a shift-angle method // Applied Sciences. 2022. V. 12. № 10. P. 5008. <https://doi.org/10.3390/app12105008>
9. Watanabe T., Fujimoto H., Nakayama K., Masuda T., Kajitani M. Automatic high-precision calibration system for angle encoder // SPIE Proceedings. 2001. V. 4401. P. 267. <https://doi.org/10.1117/12.445630>
10. Watanabe T., Fujimoto H., Masuda T. Self-calibratable rotary encoder // Journal of Physics: Conference Series. 2005. V. 13. № 13. P. 240–245. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/13/1/056>
11. Watanabe T., Kon M., Nabeshima N., Taniguchi K. An angle encoder for super-high resolution and super-high accuracy using SelfA // Measurement Science and Technology. 2014. V. 25. № 6. P. 065002. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/25/6/065002>
12. Probst R., Wittekopf R., Krause M., Dangschat H., Ernst A. The new PTB angle comparator // Measure-

- ment Science and Technology. 1998. V. 9. № 7. P. 1059–1066. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/9/7/009>
13. Geckeler R., Link A., Krause M., Elster C. Capabilities and limitations of the self-calibration of angle encoders // Measurement Science and Technology. 2014. V. 25. P. 1–10. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/5/055003>
14. Electronic resource URL: https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_Angle_Encoders_with_Integral_Bearing_ID591109_en.pdf, August 2022 (Dr. Johannes Heidenhain GmbH. Angle encoders with integral bearing)
15. Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кручинин Д.Ю., Яковлев О.Б. Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 12. С. 40–49.
16. Electronic resource URL: https://www.hpmemoryproject.org/an/pdf/an_243-7.pdf (Bearing runout measurements. Application note 243 — 7. Agilent technologies (USA). 2000).
17. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korkov V.P., Kharissov A.A., Cherkasin V.V., Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev S.A., Verhoglyad A.G. Polar coordinate laser pattern for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Applied Optics. 1999. V. 38. № 8. P. 1295–1301. [https://doi.org/https://doi.org/10.1364/AO.38.001295](https://doi.org/10.1364/AO.38.001295)
18. Абрамов Ю.Ф., Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кокарев С.А., Кручинин Д.Ю., Яковлев О.Б. Модернизация оптического делительного производства Уральского оптико-механического завода на основе современных лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 8. С. 61–65.
19. Павлов П.А. Особенности метода кросс-калибровки в лазерной гониометрии // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 21–24.
20. Portman V., Peschansky B. Phase-statistical method and device for high precise and high-efficiency angular measurements // Precision Engineering. 2001. V. 25. № 4. P. 309–315. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(01\)00084-8](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(01)00084-8)
21. Петров В.В., Митрофанов С.С. Методы и средства аттестации оптических лимбов и кодовых дисков // Оптико-механическая промышленность. 1982. № 3. С. 52–58.
22. Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev C.A., Nikitin V.G., Bartik S.A., Frizin S.E., Kruchinin D.Yu., Yakovlev O.B. Development of technique for the determination of metrological parameters of technological system CLWS-300/C for synthesize of high precision angular measuring structures // Proceeding of 10th International Symposium IMEKO. St.-Petersburg. June 30 — July 2. 2004. V. 2. P. 316–320.
23. Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Клиторин И.Ф. Экспериментальная оценка класса точности прецизионного углового преобразователя встраиваемого типа // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 11–14.
24. Кирьянов А.В., Зотов А.А., Каракоцкий А.Г., Кирьянов В.П., Петухов А.Д., Чуканов В.В. Оперативный контроль оптических прецизионных углоизмерительных структур // Оптический журнал. 2019. № 9. С. 60–62. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-09-60-62>
25. Kiryanov A.V., Kiryanov V.P. Improving synthesis accuracy of topology elements in laser pattern generators
- ment Science and Technology. 1998. V. 9. № 7. P. 1059–1066. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/9/7/009>
13. Geckeler R., Link A., Krause M., Elster C. Capabilities and limitations of the self-calibration of angle encoders // Measurement Science and Technology. 2014. V. 25. P. 1–10. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/5/055003>
14. Electronic resource URL: https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_Angle_Encoders_with_Integral_Bearing_ID591109_en.pdf, August 2022 (Dr. Johannes Heidenhain GmbH. Angle encoders with integral bearing)
15. Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kruchinin D.Yu., Yakovlev O.B. Analysis of modern technologies for synthesizing goniometric structures for high-accuracy angle measurements (Analytical review) // Journal of Optical Technology. 2007. V. 74. № 12. P. 823–830. <https://doi.org/10.1364/JOT.74.000823>
16. Electronic resource URL: https://www.hpmemoryproject.org/an/pdf/an_243-7.pdf (Bearing runout measurements. Application note 243 — 7. Agilent technologies (USA). 2000).
17. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korkov V.P., Kharissov A.A., Cherkasin V.V., Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev S.A., Verhoglyad A.G. Polar coordinate laser pattern for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Applied Optics. 1999. V. 38. № 8. P. 1295–1301. [https://doi.org/https://doi.org/10.1364/AO.38.001295](https://doi.org/10.1364/AO.38.001295)
18. Abramov Yu.F., Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev S.A., Kruchinin D.Yu., Yakovlev O.B. Modernizing the optical divider production of the Ural Optomechanical Factory on the basis of up-to-date laser-computer and photo-lithographic technologies // Journal of Optical Technology. 2006. V. 73. № 8. P. 544–547. <https://doi.org/10.1364/JOT.73.000544>
19. Pavlov P.A. Aspects of the cross-calibration method in laser goniometry // Measurement Techniques. 2015. V. 58. № 9. P. 970–974. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0827-7>
20. Portman V., Peschansky B. Phase-statistical method and device for high precise and high-efficiency angular measurements // Precision Engineering. 2001. V. 25. № 4. P. 309–315. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(01\)00084-8](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(01)00084-8)
21. Petrov V.V., Mitrofanov C.C. Methods and means of certification of optical limbs and code disks // Optical and mechanical industry. 1982. № 3. P. 52–58.
22. Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev C.A., Nikitin V.G., Bartik S.A., Frizin S.E., Kruchinin D.Yu., Yakovlev O.B. Development of technique for the determination of metrological parameters of technological system CLWS-300/C for synthesize of high precision angular measuring structures // Proceeding of 10th International Symposium IMEKO. St.-Petersburg. June 30 — July 2. 2004. V. 2. P. 316–320.
23. Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Klistorin I.F. Experimental evaluation of the accuracy class of a precision angle converter of an embedded type // Sensor and system. 2009. № 1. P. 11–14.
24. Kiryanov A.V., Zotov A.A., Karakotskii A.G., Kiryanov V.P., Petukhov A.D., Chukanov V.V. Online monitoring of optical precision goniometric structures // Journal of Optical Technology. 2019. V. 86. № 9. P. 579–581. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000579>
25. Kiryanov A.V., Kiryanov V.P. Improving synthesis accuracy of topology elements in laser pattern generators

- with circular scanning mode // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 497–506. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_53
26. Чжан Чунь Пин. Исследование точности прецизионных муфт при производстве // Дисс. канд. техн. наук. СПб.: ИТМО, 1998. 152 с.
- with circular scanning mode // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 497–506. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_53
26. Zhang Chun Ping. Research on the accuracy of precision couplings in production // PhD thesis. Saint-Petersburg: ITMO, 1998. 145 p.

АВТОР

Алексей Валерьевич Кирьянов — канд. техн. наук, заведующий лабораторией, Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 6602727886, <https://doi.org/0000-0002-1239-2262>, alexey@iae.nsk.su

Статья поступила в редакцию 10.03.2023
Одобрена после рецензирования 05.09.2023
Принята к печати 30.10.2023

AUTHOR

Alexey V. Kiryanov — PhD, Head of Laboratory, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 6602727886, <https://doi.org/0000-0002-1239-2262>, alexey@iae.nsk.su

*The article was submitted to the editorial office 10.03.2023
Approved after review 05.09.2023
Accepted for publication 30.10.2023*