

УДК 535.4:621.317

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛНОГО ПОДАВЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОТ НЕТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ РЕШЁТКИ

© В. П. Кирьянов¹, А. В. Кирьянов^{1,2}¹*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*²*Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: alexey@iae.nsk.su*

Показана возможность полного подавления инструментальной погрешности, обусловленной неточностью изготовления углоизмерительной структуры, которая реализуется при произвольной форме поля взаимодействия светового излучения с топологией измерительной структуры. Данная возможность достигается выбором необходимой структуры преобразователя, для которой обеспечивается принцип когерентности комплементарных гребенчатых фильтров, формируемых в преобразователе.

Ключевые слова: угловые преобразователи, инструментальная погрешность, комплементарные гребенчатые фильтры, фильтр простого скользящего среднего, дифракционная решётка.

DOI: 10.15372/AUT20230302

Введение. Разработчикам углоизмерительной аппаратуры давно известен метод интегрального считывания информации, теоретически обеспечивающий полное подавление систематической составляющей инструментальной погрешности преобразования, которая обусловлена неточностью изготовления измерительного растра [1, 2]. Хорошо известны также и трудности технической реализации данного метода на практике. В [3] было аналитически доказано, что эффект полного подавления инструментальной погрешности, обусловленной неточностью изготовления измерительного растра, может быть реализован в угловых преобразователях с помощью традиционной схемы многоголовочного считывания информации. Для этого требуется обеспечить принцип когерентности характеристик гребенчатых фильтров пропускающего и режекторного видов, формируемых в структурной схеме углового преобразователя. В результате их совместного действия систематическая составляющая инструментальной погрешности данного типа обнуляется и остаются лишь случайные составляющие вклада погрешности квантования угла. Эффект полного подавления достигается за счёт согласования порядков фильтров путём выбора нужного числа считывающих головок в преобразователе, числа штрихов измерительного растра, размеров окон и конструкции маски в индикаторных растрах считывающих головок.

Анализ технических решений, положенных в основу реализации метода подавления инструментальной погрешности, показывает, что выбор конкретных решений во многом определяется параметрами растровых сопряжений, используемых в считывающих головках создаваемого преобразователя. Ключевым параметром является число штрихов измерительного растра, в каждый конкретный момент времени формирующих выходные квадратурные сигналы считывающих головок. Каждое растровое сопряжение рассматривается как фильтр простого скользящего среднего [4, 5], порядок которого определяется числом штрихов, участвующих в формировании выходного сигнала. При этом каждый элемент

фильтра с равным «весом» участвует в формировании выходного сигнала. Как следствие, используемая геометрия растрового сопряжения — прямоугольник, размер одной стороны которого равен сумме периодов этих штрихов. Размер второй стороны произволен и определяется размерами рабочего поля фотоприёмника, воспринимающего световой поток от растрового сопряжения.

Однако не все угловые преобразователи используют в своём составе растровые сопряжения. Например, преобразователи, собранные на основе дифракционных решёток, формируют выходные сигналы с помощью интерферометров. В них световое излучение взаимодействует с дифракционной решёткой, в результате чего формируются так называемые дифракционные порядки, которые тем или иным образом приводят к интерференции для формирования выходных сигналов. Чаще всего в этих преобразователях поле взаимодействия светового излучения с решёткой имеет конфигурацию круга. Как следствие, вклады в результат формирования выходного сигнала от каждого штриха дифракционной решётки разные. Это означает, что рассмотренный в [3] метод полного подавления искажающего вклада систематической составляющей инструментальной погрешности от неточности изготовления дифракционной решётки в таких преобразователях может и не работать.

Целью данного сообщения является демонстрация работоспособности метода при произвольной форме поля взаимодействия светового излучения и измерительного растра.

Обзор оптических схем угловых преобразователей на дифракционных решётках. Как уже упоминалось, в [3] рассмотрен вариант углового преобразователя, реализующего мультикомбинационный принцип построения ансамбля считывающих головок формата 459 [6]. Данный формат предполагает использование 16 считывающих головок и обеспечивает пропускание только 180-й и кратных ей гармоник ($4 \times 5 \times 9 = 180$). Аналитически в [3] показано, что применение такого ансамбля считывающих головок при использовании измерительного растра с числом штрихов, равным 36 000, а также матрицы индикаторных растров с окнами, имеющими размеры $2,52 \times 2,0$ мм, позволяет, в принципе, полностью подавить искажающее действие инструментальной погрешности растра. Как следствие, результирующая погрешность такого углового преобразователя будет определяться теперь только случайной составляющей, вызванной погрешностью квантования. При $N = 36\,000$ штрихов угловой размер кванта q (периода шкалы) равен $36''$. Известно, что величину погрешности измерений, обусловленную процедурой квантования угла, оценивают как $\pm q/2$, что для анализируемого случая соответствует $\pm 18''$. Для нужд метрологии данный результат имеет низкую точность. Поэтому для подобных применений считается обязательным использование процедуры интерполяции [7]. Для растровых сопряжений, когда форма квадратур несколько отличается от синусоид, приемлемым считается использование коэффициента интерполяции не выше 2048. При применении подобного коэффициента интерполяции погрешность квантования будет находиться в пределах $\pm 0,01''$. И именно она определит результирующие метрологические характеристики преобразователя.

Если ставится задача снижения результирующей погрешности преобразователя до уровня заметно ниже $0,01''$, то необходимо переходить от растровых сопряжений к преобразованиям на основе дифракционных решёток с периодом следования штрихов порядка $4,0$ мкм и менее. В таких преобразователях считывание производится с помощью интерферометров, которые вносят дополнительное удвоение чувствительности преобразователя. Кроме того, из-за малых нелинейных искажений выходных сигналов здесь возможно применение коэффициентов интерполяции выше 2048, например 4096 и даже 8192. Таким образом, в преобразователях, использующих измерительные шкалы с числом штрихов порядка 225 000 и периодом менее $4,0$ мкм, погрешность квантования может быть снижена до $\pm 0,0002''$. Чтобы результирующая погрешность создаваемого преобразователя лежала

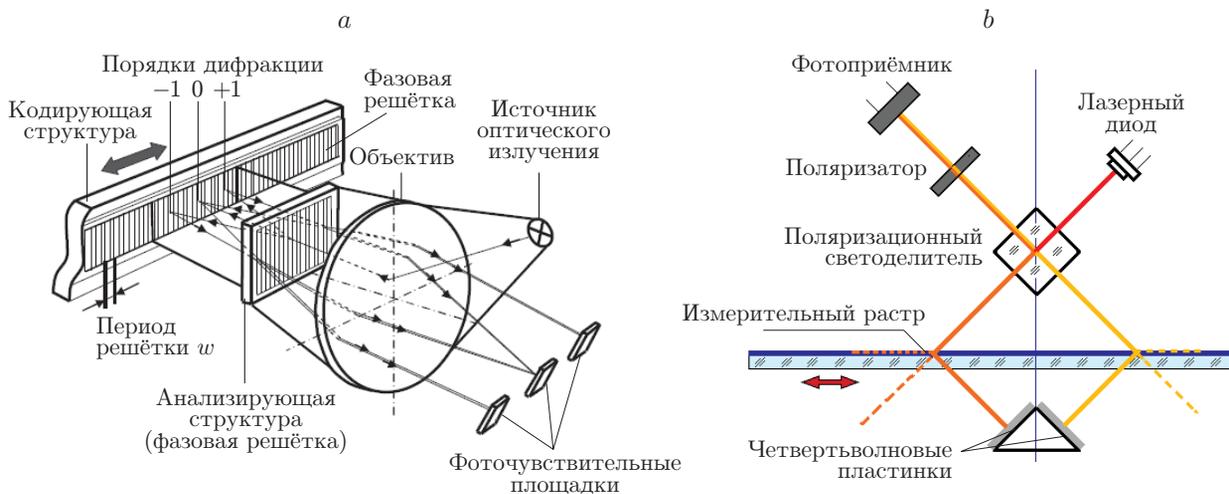


Рис. 1. Функциональные схемы систем с фазовым принципом модуляции светового излучения на базе дифракционных решёток: *a* — конфигурация фазовой системы считывания, реализованной фирмой Heidenhain, *b* — конфигурация фазовой системы считывания, реализованной фирмой Sony

в этих пределах, необходимо рассчитать параметры его основных узлов для реализации принципа когерентности комплементарных решётчатых фильтров.

Выводы, сформулированные в [3], останутся без изменений для преобразователей в исполнении немецкой фирмы Heidenhain [8], использующих фазовый принцип модуляции оптического излучения на базе дифракционных решёток (рис. 1, *a*).

Считывающая головка подобного преобразователя спроектирована для использования измерительных шкал с периодом штрихов порядка (4–8) мкм. В ней применена специальная фазовая анализирующая структура прямоугольной формы, аналогичная форме индикаторных растров в считывающих головках с амплитудным принципом модуляции светового поля. Профили штрихов сформированы таким образом, что интенсивности в порядках дифракции -1 , 0 , $+1$ практически одинаковы. Эти порядки после отражения от измерительной шкалы совмещаются на анализирующей структуре, снова дифрагируют и выделенные порядки приводят к интерференции. Выделяют три интерферирующих пучка, которые после дифракции на анализирующей структуре выходят под разными углами. Объектив направляет их на три фотоприёмника, которые преобразуют падающие на них потоки излучения в три сдвинутых по фазе (-90° , 0 , $+90^\circ$) электрических сигнала.

Если излучение от используемого источника засвечивает анализирующую структуру преобразователя полностью, то выводы о свойствах фильтра простого скользящего среднего, сделанные для амплитудного принципа модуляции, будут пригодны и для оценки свойств подобного фильтра, но реализуемого на основе фазового метода модуляции оптического излучения. Например, для дифракционной решётки с числом штрихов, равным 225 000, для получения характеристических частот, кратных $\omega_M = 180$, потребуется анализирующая структура со стороной 5 мм.

На практике более распространены варианты угловых преобразователей, у которых области взаимодействия оптического излучения с измерительными решётками фазового типа представлены поперечными сечениями световых пучков круглой формы. Данная ситуация наблюдается в преобразователях ВН-200 фирмы Sony [9] или X1-M фирмы Canon [10]. На рис. 1, *b* приведена функциональная схема считывания, созданная фирмой Sony. Здесь дифракционную структуру измерительного раstra с периодом штрихов, равным 1

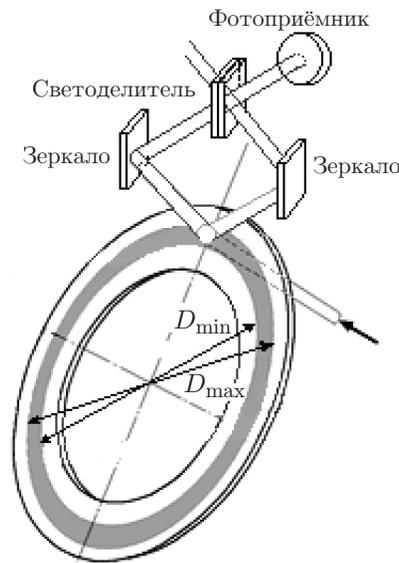


Рис. 2. Считывание с фазовой структуры с помощью дифракционного интерферометра Тальбота

мкм, подсвечивают с помощью световых лучей, поперечное сечение которых имеет круглую форму. К сожалению, приведённые схемы считывающих головок данных угловых преобразователей занимают в пространстве значительный объём и мало подходят для создания мультикомбинационных преобразователей. Для данных целей больше подходят считывающие головки на основе интерферометра Тальбота.

На рис. 2 приведена упрощённая оптическая схема считывающей головки на основе интерферометра Тальбота, работающего в проходящем свете. Падающее на дифракционную решётку световое излучение в области взаимодействия дифрагирует в целый набор дифракционных порядков, из этого набора выделяют только одноимённые порядки с разными знаками (чаще всего это ± 1 -е порядки дифракции).

С помощью зеркал и светоделителя выделенные дифракционные порядки приводят к интерференции, а после неё выходящие суммарные световые потоки проектируют на рабочие поверхности фотоприёмников (см. рис. 2). Если на фоточувствительную поверхность фотоприёмника попадает всё сечение суммарного пучка, то для такого случая можно получить соотношение между размерами светового пятна, освещающего дифракционную структуру измерительного раstra, и размерами самого раstra. Можно, например, оценить характеристические частоты фильтра скользящего среднего при произвольной форме взаимодействующих пучков либо оценить диаметр светового пучка, подсвечивающего измерительный растр с 225 000 штрихов и с периодом штрихов, равным 4 мкм, который обеспечивает получение характеристических частот, кратных $\omega_M = 180$.

Оценка параметров режекторного фильтра при произвольной форме пятна взаимодействия. Выше отмечалось, что свойства режекторного фильтра типа простого скользящего среднего определялись для прямоугольной формы поля взаимодействия светового излучения и углоизмерительной структуры. В этом случае численные значения номеров характеристических частот ω_{M_i} растровых сопряжений зависят и от общего числа штрихов N в измерительном растре, и от числа штрихов индикаторного раstra m , участвующих в формировании выходного сигнала

$$\omega_{M_i} = \frac{N}{m}. \quad (1)$$

При произвольной форме поля взаимодействия приходится рассматривать уже не фильтр простого скользящего среднего, а фильтр «взвешенного» скользящего среднего с не совсем ясным конечным результатом. Задача анализа несколько упрощается, если применяется каноническая форма поля взаимодействия, например, в виде круга.

Чтобы оценить параметры режекторного фильтра при круговой форме поля взаимодействия, необходимо перейти от линейных параметров фильтра к двумерным. Для этого в соотношении (1) и знаменатель, и числитель дроби умножим на величину d , где d — период следования штрихов в дифракционной решётке. В результате будем иметь

$$\omega_{M_i} = \frac{Nd}{md} = \frac{L}{b}, \quad (2)$$

где L — длина окружности среднего диаметра измерительного растра, а b — длинная сторона анализирующей структуры. Но это всё ещё одномерные величины. Поэтому умножим и числитель, и знаменатель выражения (2) на параметр h , где h — ширина окна прямоугольной анализирующей структуры, и получим

$$\omega_{M_i} = \frac{Lh}{bh} = \frac{S}{s}, \quad (3)$$

где S — площадь кольца, в котором сосредоточены области взаимодействия светового излучения с дифракционной решёткой при вращении последней, s — площадь прямоугольной анализирующей структуры.

В результате получился далеко не очевидный постулат о том, что характеристические частоты фильтра простого скользящего среднего пропорциональны отношению площадей взаимодействующих структур: поперечного сечения светового пучка и кольца дифракционной структуры, в котором осуществляется взаимодействие светового излучения с топологией углоизмерительной структуры.

Поскольку соотношение (3) в своём конечном виде не предъявляет каких-либо требований к форме поля взаимодействия, то данное соотношение позволяет перейти от классической прямоугольной анализирующей структуры к взаимодействию световых полей канонической формы, освещающих дифракционную решётку, например круглого сечения. Площадь S кольца, в котором сосредоточены области взаимодействия светового излучения с дифракционной решёткой, имеет вид

$$S = \frac{\pi}{4} (D_{\max}^2 - D_{\min}^2) = \frac{\pi}{4} (D_{\max} - D_{\min})(D_{\max} + D_{\min}) = \pi d_0 D_{\text{mid}}. \quad (4)$$

Здесь D_{\max} — внешний диаметр кольца, в котором сосредоточены области взаимодействия светового излучения с дифракционной решёткой, а D_{\min} — внутренний диаметр. При этом их разность в (4) можно представить как

$$D_{\max} - D_{\min} = 2d_0, \quad (5)$$

где d_0 — диаметр светового пятна на поверхности дифракционной решётки, а их сумму — как

$$D_{\max} + D_{\min} = 2D_{\text{mid}}, \quad (6)$$

где D_{mid} — средний диаметр кольцевой зоны дифракционной решётки.

Площадь светового пятна круглого сечения s_0 на поверхности дифракционной решётки можно представить как

$$s_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2.$$

Тогда по аналогии с анализирующей структурой прямоугольной формы получим для значений ω_{M_i} следующее соотношение:

$$\omega_{M_i} = \frac{S}{s_0} = \frac{\pi d_0 D_{\text{mid}}}{\pi d_0^2/4} = \frac{4D_{\text{mid}}}{d_0} = 4 \frac{D_{\text{mid}}/d}{d_0/d} = 4 \frac{N_D}{m_d}, \quad (7)$$

здесь N_D — число штрихов дифракционной решётки, приходящихся на средний диаметр кольцевой зоны дифракционной решётки, а m_d — число штрихов дифракционной решётки, приходящихся на диаметр светового пятна.

Обсуждение результатов анализа. Соотношение (7) позволяет оценить необходимое поперечное сечение светового пучка на поверхности дифракционной решётки, например, для структуры, имеющей на среднем диаметре шаг штрихов, равный 4 мкм, и общее число штрихов, равное 225 000. Изначально для анализа было принято, что система считывания информации в преобразователе реализует мультикомбинационный принцип построения ансамбля считывающих головок формата 459, обеспечивающего $\omega_{M_i} = 180$. Для выбранных параметров решётки её средний диаметр

$$D_{\text{mid}} = \frac{Nd}{\pi} = 286,479 \text{ мм.}$$

Число штрихов, приходящихся на средний диаметр решётки,

$$N_D = \frac{D_{\text{mid}}}{d} = 71\,620.$$

Число штрихов, перекрываемых световым пятном круглого сечения,

$$m_d = \frac{4N_D}{\omega_{M_i}} = 1\,592.$$

Следовательно, диаметр светового пятна на поверхности дифракционной решётки, при котором реализуется эффект полного подавления искажающего вклада инструментальной погрешности решётки, должен быть $d_0 = 6\,368$ мкм (или 6,4 мм).

Нетрудно заметить, что диаметр пятна засветки топологии решётки оказался несколько бóльшим, чем размер длинной стороны окна индикаторного раstra, который потребуется в случае растрового сопряжения прямоугольной формы. Это можно объяснить тем, что при считывании подсвечиваются различные по величине части штрихов дифракционной решётки. Линейные размеры этих частей специфические и определяются формой поперечного сечения светового потока.

Заключение. В данной работе аналитически показана возможность полного подавления в угловых преобразователях на кольцевых дифракционных решётках искажающего вклада погрешности, обусловленной неточностью изготовления углоизмерительной структуры. Эффект достигается при использовании мультикомбинационной структуры считывающих головок определённого формата, определённого числа штрихов в кольцевой дифракционной решётке и соответствующего диаметра поперечного сечения светового пятна, освещающего дифракционную решётку, например, формата 459, числа штрихов 225 000, диаметра пятна 6,4 мм соответственно.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 121042900050-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борштак Н. М.** Интегральный метод деления окружности // Измерительная техника. 1958. № 1. С. 16–17.
2. **А. с. № 3554932 СССР.** Фотоэлектрический датчик угловых перемещений Монченко /И. М. Монченко, А. В. Белый, В. А. Иванов. Кл. G01с 1/06; Заявл. 24.11.1969; Опубл. 16.10.1972, Бюл. № 31.
3. **Кирьянов А. В., Кирьянов В. П.** Применение когерентных решётчатых фильтров в гониометрии // Автометрия. 2021. **57**, № 6. С. 49–59. DOI: 10.15372/AUT20210605.
4. **Кирьянов В. П., Зюбин В. Е., Кирьянов А. В. и др.** Моделирование инструментальной погрешности фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа, обусловленной неточностью изготовления раstra // Вестн. НГУ. Сер. Информационные технологии. 2015. **13**, вып. 2. С. 34–41.
5. **Максимов А. С.** Исследование интегрирующих свойств растрового сопряжения // Матер. Междунар. науч. студ. конференции «МНСК – 2014, Инструментальные методы и техника экспериментальной физики». Новосибирск: НГУ, 2014. С. 48.
6. **Watanabe T., Kon M., Nabeshima N., Taniguchi K.** An angle encoder for super-high resolution and super-high accuracy using SelfA // Meas. Sci. Technol. 2014. **25**, N 6. 065002.
7. **Кирьянов А. В., Кирьянов В. П., Чуканов В. В.** Алгоритмы интерполяции квадратурных сигналов для высокоразрешающих преобразователей линейных и угловых перемещений // Автометрия. 2019. **55**, № 1. С. 64–71. DOI: 10.15372/AUT20190109.
8. **Heidenhain.** Exposed Linear Encoders. Traunreut, Germany, 2021. 75 p. URL: https://www.heidenhain.com.cn/fileadmin/pdb/media/img/208960-2H.Exposed_Linear_Encoders_en_web.pdf (дата обращения: 18.01.2023).
9. **Magnescape.** Laserscale. Magnescape Co., Ltd. Suzukawa, Japan, 2018. 31 p. URL: https://www.magnescape.com/product/catalog/Laserscale_en.pdf (дата обращения: 18.01.2023).
10. **Canon.** Laser rotary encoder. URL: <http://vertassets.blob.core.windows.net/download/98740723/98740723-34fc-455f-a9a3-2c4076d898cd/canon.pdf> (дата обращения: 18.01.2023).

Поступила в редакцию 18.01.2023

После доработки 10.03.2023

Принята к публикации 20.03.2023
