

23. Датчик линейных перемещений на основе структурированных измерительных шкал

А. Ю. Жердев, М. В. Шишова, Д. С. Лушников, С. Б. Одинокоев, В. В. Маркин

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Датчик линейных перемещений, работающий согласно интерференционному методу, состоит из измерительной шкалы и измерительной головки, перемещающихся друг относительно друга. Шкала включает отражательную дифракционную решётку на поверхности, а измерительная головка содержит пропускающую дифракционную решётку с равным периодом внутри. Лазерное излучение проходит и дифрагирует на этих двух решётках и образует интерференционный сигнал на оптическом датчике. Декодирование фазы интерференционного сигнала позволяет определять текущее положение. Известные оптические датчики перемещения используют сложные оптические схемы и фазовые оптические элементы для формирования квадратурных сигналов с различными фазами для повышения точности измерения. Ранее мы публиковали исследования схем такого вида [1, 2]. В этой работе мы предлагаем использовать каноническую оптическую схему без фазовых элементов, но со сложной структурированной решёткой измерительной головки для той же цели, чтобы упростить оптическую схему требования юстировки. Оптическая схема датчика перемещения основанная на решётке измерительной головки с особой структурой исследована и описана в этой работе.

Ключевые слова: Датчик линейных перемещений, Оптический энкодер, Дифракционные решётки.

Цитирование: Жердев, А. Ю. Датчик линейных перемещений на основе структурированных измерительных шкал / А. Ю. Жердев, М. В. Шишова, Д. С. Лушников, С. Б. Одинокоев, В. В. Маркин // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 102–108.

Введение

Современный технологический уровень в промышленности подразумевает, что погрешность изготовления для ответственных изделий составляет порядка 0,01–0,1 мкм и разрешение измерения при контроле составляет порядка 1–10 нм. Для удовлетворения этих требований в ЧПУ-станках, системах электронно-лучевой литографии и прецизионном измерительном оборудовании необходимо использовать датчики линейных перемещений (энкодеры) для приводов двигателей с упомянутыми параметрами: разрешение порядка 1 нм и погрешность измерения порядка 0,1 мкм на 100 мм [4, 5].

Датчики линейного перемещений состоят из измерительной шкалы и измерительной головки, движущихся относительно друг друга в процессе измерения. Существует много типов датчиков линейных перемещений: емкостные, индуктивные, на основе вихревых токов, магниторезистивные, магнитострикционные, потенциометрические, ультразвуковые и оптические. Оптические датчики линейного перемещения обладают самым высоким разрешением по сравнению с другими. В основе оптического датчика может лежать теневой или интерференционный метод.

В теневом методе [6] используется две решётки периодом порядка 10 мкм в головке и шкале для создания картины Муара с переменной интенсивностью в определённой точке, зависящей от смещения шкалы. В этой точке расположен оптический детектор и смещение шкалы вычисляется в процессе обработки переменного сигнала с детектора. В интерференционном методе [7] используются две дифракционные решётки с периодом порядка 1 мкм для создания переменного оптического сигнала путём интерференции лазерных

пучков, полученных после дифракции излучения лазера на этих решётках. Образуется интерференционная полоса бесконечной ширины, фаза (интенсивность сигнала на детекторе) которой зависит от смещения шкалы. Величина смещения шкалы также рассчитывается путём обработки переменного сигнала с детектора.

Измерительные шкалы можно изготовить фотолитографическим, голографическим, нарезным методами, а также с помощью электроннолучевой литографии и посредством рольной печати. Фотолитографический метод [8] не обеспечивает периоды менее 10 мкм, и поэтому подходит только для теневых датчиков линейных перемещений. Голографический метод не позволяет изготовить длинные шкалы несинусоидального профиля. Литографический метод обладает огромными возможностями для изготовления дифракционных решеток совершенно различного профиля. Тем не менее, для того, чтобы избежать ошибки стыковки фреймов в шкалах большого масштаба, требуются наиболее современные и дорогостоящие литографы. Метод рольной печати [9] относительно новый.

1. Оптическая схема

Стандартная оптическая схема датчика линейных перемещений, работающего по интерференционному методу формирования измерительного сигнала показана на рис. 1.

Излучение от лазерного источника по нормали падает в точку А на анализирующую шкалу — пропускающую дифракционную решётку (с периодом $T=1$ мкм), расположенную в измерительной головке датчика. Формируются три дифракционных порядка: проходящий и два +1 и –1 дифракционных максимумы. После этого прошедшее и дифрагировавшее в +1 по-

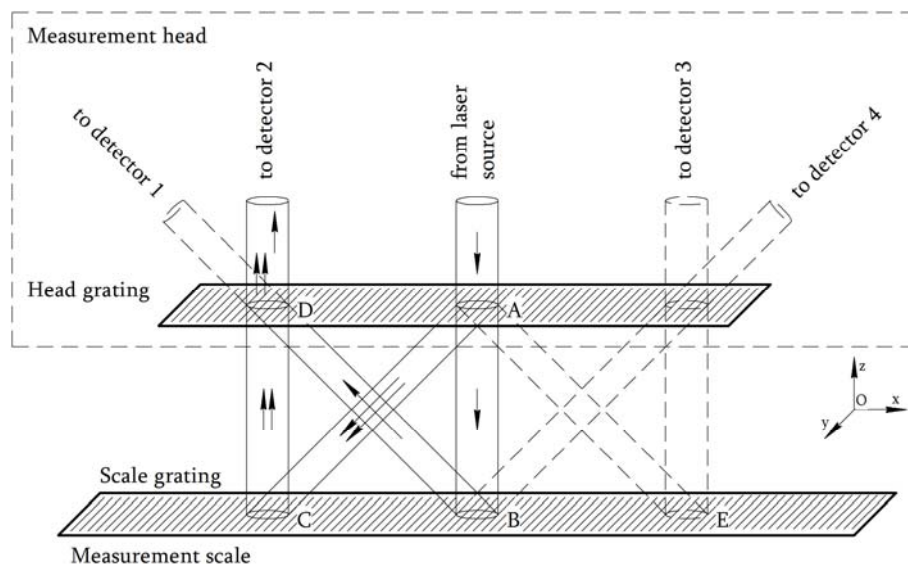


Рис. 1. Оптическая схема датчика на основе дифракционных решёток

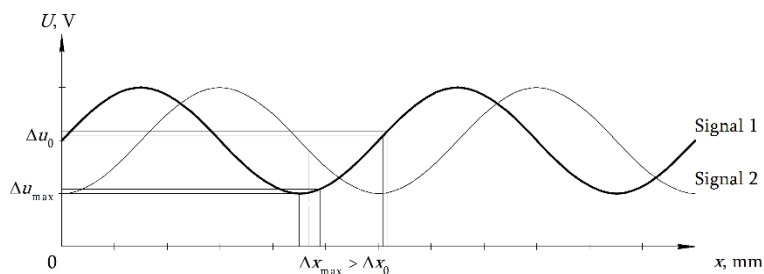


Рис. 2. Зависимость квадратурных сигналов от координаты перемещения

рядке излучение попадает в точках В и С на кодирующую шкалу — отражательную дифракционную решетку (с таким же периодом $T=1\text{ мкм}$), расположенную на перемещаемом объекте. Две эти оптические волны снова дифрагируют в $+1$ и -1 максимумы, приобретая смещение фаз $+2\pi x/T$ и $-2\pi x/T$ (различные знаки обоснованы соответствующими направлениями дифракции относительно направления перемещения). Здесь x — это величина перемещения кодирующей шкалы относительно измерительной головки в направлении оси Ox внутри периода T ($x < T$). Затем обе волны снова претерпевают дифракцию на анализирующей шкале в точке D. Волна в $+1$ порядке при последней дифракции, и прошедшая часть второй волны интерферируют, формируя бесконечную полосу на приемнике излучения 2. Фазы интерферирующих волн складываются так, что фазовый вклад от смещения кодирующей шкалы составляет $4\pi x/T$. Так формируется сигнал 2.

Аналогичным образом формируется сигнал 3. Но в силу других рабочих точек в канале 3 (точки В и Е вместо точек В и С), наличие угла между измерительными шкалами может повлечь внесение дополнительной разности фаз между 2 и 3 каналами в силу ошибки симметрии схемы. Поэтому с помощью юстировки оптической схемы, мы добиваемся разности фаз $\pi/2$ между сигналами 2 и 3, и таким образом формируем пару квадратурных сигналов. Однако, изменение угла

между дифракционными решетками при смещении измерительной головки вдоль шкалы ведет к нестабильности этой компоненты разности фаз квадратурных сигналов.

Если фактор заполнения анализирующей дифракционной решетки отличается от 0,5 (ширина канавки не равна половине периода $T/2$), то постоянная компонента фазы интерференционной полосы появляется также в канале 2. Величина этой компоненты зависит от параметров микрорельефа и вносится со второй волной при прохождении точки D.

В силу симметрии схемы, нет постоянной разности фаз между сигналами 2 и 3.

Сигнал 1 формируется аналогично сигналу 2: одна из интерферирующих волн проходит через точку D на анализирующей шкале, вторая же дифрагирует, внося такую же постоянную фазовую компоненту в распределение бесконечной полосы, но с противоположным знаком.

Суммарная разность фаз между сигналами 1 и 2 равна сумме сдвигов фаз, приобретаемых двумя волнами при прохождении измерительной головки. Для каналов 1 и 2 рабочие точки дифракции на кодирующей шкале аналогичны каналам 3 и 4, поэтому нет серьезной зависимости разности фаз квадратурных сигналов от юстировки схемы датчика линейных перемещений.

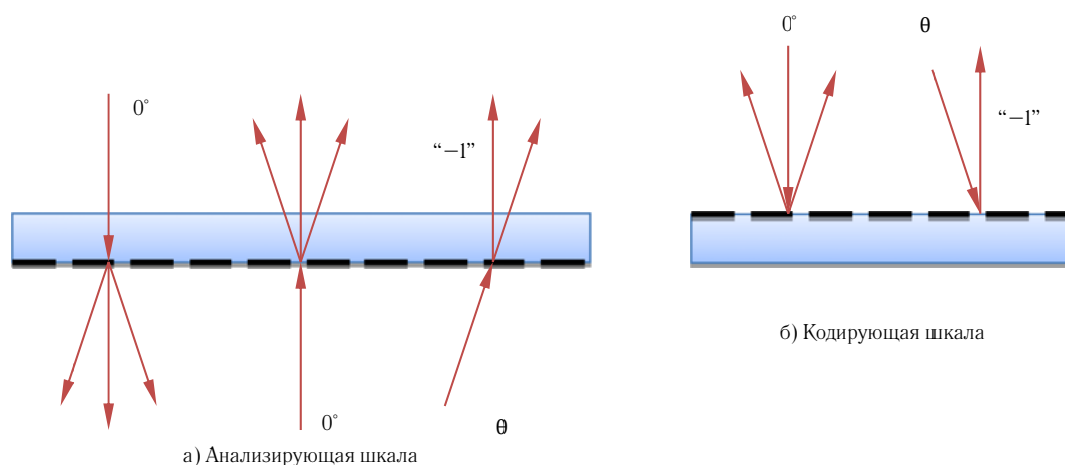


Рис. 3. Используемые в схеме порядки дифракции

При определении значения перемещений, используя область экстремума интерференционного сигнала, обеспечивается очень низкое разрешение, как показано на рис. 2. Для того, чтобы увеличить разрешение энкодера и распознать направление перемещения, необходимо, как минимум, два измерительных сигнала, формирующих квадратурную пару (синусоидальный SIN и косинусоидальный COS) [4].

Датчик, где определение перемещений основано на сигналах 2 и 3, использует три рабочие точки дифракции на кодирующей шкале, рассогласованные на некоторую величину. Это ограничивает возможности минимизации габаритов по измерительной шкале. Как показали предшествующие исследования [1], допустимый угол относительного поворота шкал составляет $10''$ для датчиков, использующих поворот при первичной юстировке для получения квадратурных сигналов. Это накладывает высокие требования на параметры юстировки шкал.

Мы предлагаем использовать в качестве анализирующей шкалы дифракционные решетки с фактором заполнения, отличным от 0,5 и необходимой высоты микрорельефа. Это позволит уменьшить зависимость формы квадратурных сигналов в каналах 1 и 2, а также зависимость разности фаз от юстировочных погрешностей оптической системы. Современная электронно-лучевая литография позволяет изготовить дифракционные решетки с такими специфическими параметрами. Дополнительно, это позволит уменьшить рабочую область кодирующей шкалы.

2. Теоретические исследования

В ходе теоретических исследований мы провели математическое моделирование и с использованием метода Фурье-мод для анализа распространения электромагнитных волн, преобразованных структурированной средой или метаповерхностью. Моделирование проводилось для поверхностей с прямоугольным, синусоидальным и треугольным профилями (полученные литографическим, голографическим и нарезным методами соответственно).

Как показано на оптической схеме на рис. 1, две оптические волны, формирующие интерференционный сигнал на приемнике излучения 4, проходят следующие оптические пути. Первая волна проходит анализирующую шкалу в точке А, и дифрагирует на кодирующей шкале в точке В, затем второй раз проходит анализирующую шкалу в точке D. Вторая волна дифрагирует на анализирующей шкале в точке А, затем дифрагирует на кодирующей шкале в точке С и снова на анализирующей шкале в точке D. Обе волны дифрагируют на кодирующей шкале (одна падает по нормали, другая под углом θ), но первая дважды проходит в нулевом порядке, а вторая дважды дифрагирует на анализирующей шкале.

Это усложняет условия обеспечения достаточного контраста для пары сигналов в схеме. Для максимизации контраста интерференционного сигнала, интенсивности обеих оптических волн должны быть равны. Значит, условия для энергетических характеристик следующие.

$$\tau_n(0^\circ)\eta_s(0^\circ)\tau_n(\theta) = \eta_n(0^\circ)\eta_s(\theta)\eta_n(\theta),$$

где τ — коэффициент пропускания, η — дифракционная эффективность, индекс Н (head) относится к анализирующей шкале, расположенной в измерительной головке, индекс S (scale) к кодирующей шкале.

Все возможные случаи преобразования излучения дифракционными решетками в схеме датчика линейных перемещений показаны на рис. 3.

График на рис. 4 иллюстрирует расчётные зависимости дифракционной эффективности η для нормального падения и падения под углом θ в зависимости от высоты профиля рельефа h , соответственно условиям применения в схеме (рис. 3). Как видно из графика, оптимальная величина высоты профиля составляет $h = 170 \pm 20$ нм для измерительной шкалы периодом $T = 1$ мкм. В этом случае дифракционная эффективность достигает $\eta = 0,45$. Кроме того, дифракционная эффективность для нормального падения и для паде-

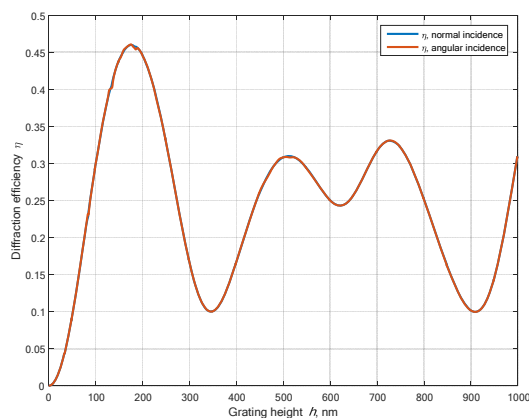


Рис. 4. Энергетические характеристики отражательной прямоугольной (литографической) дифракционной решетки

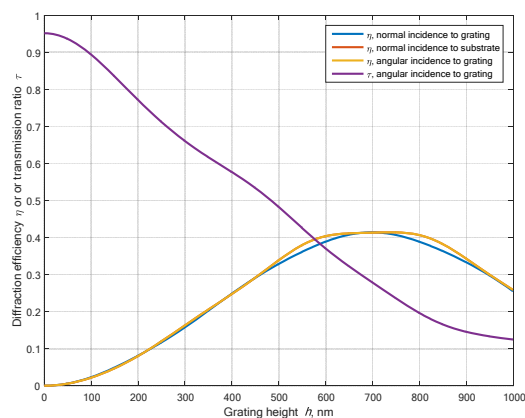


Рис. 5. Энергетические характеристики пропускающей прямоугольной (литографической) дифракционной решетки

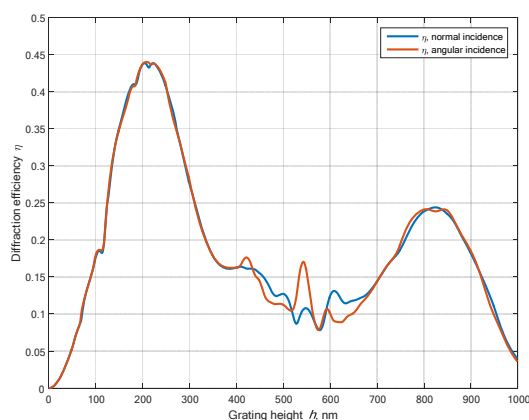


Рис. 6. Энергетические характеристики отражательной синусоидальной (голографической) дифракционной решетки

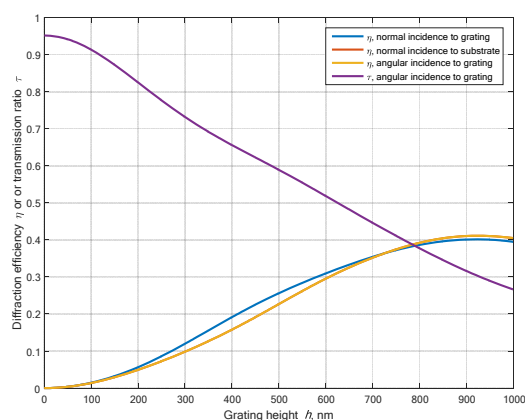


Рис. 7. Энергетические характеристики пропускающей синусоидальной (голографической) дифракционной решетки

ния под углом θ равны для всех высот, поэтому кодирующая шкала не влияет на контраст интерференционного сигнала.

График на рис. 5 иллюстрирует расчётные зависимости дифракционной эффективности η для рабочих порядков и коэффициент пропускания τ в зависимости от высоты профиля рельефа h для анализирующей шкалы. Из графика видно, что требуется высота профиля рельефа 600 нм, что технологически сложно обеспечивается для прямоугольных решеток периодом 1 мкм.

График на рис. 6 иллюстрирует энергетические характеристики для отражательной синусоидальной (голографической) решетки, очень схожие с представленными на рис. 4. Оптимальная высота составляет около 210 ± 20 нм.

Энергетические характеристики пропускающей синусоидальной (голографической) решетки, показанные на рис. 7, аналогичны характеристикам, полученным для прямоугольного профиля. Оптимальная высота в данном случае составляет более 800 нм, чего практически невозможно достичь при репликации.

Проведенное моделирование показывает, что анализирующая и кодирующая шкалы должны иметь

разную высоту профиля при одинаковой величине периода. Во-первых, можно было бы предложить изготовить анализирующую и кодирующую шкалы в виде копий с одной мастер-решетки. Это позволит обеспечить совпадающий микрорельеф измерительных шкал выполнить высокие требования равенства периода, но это невозможно. Анализирующая шкала должна иметь большую высоту, что удорожит процесс изготовления, и обеспечение требуемого фактора заполнения уходит на второй план.

3. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований мы разработали интерференционный датчик линейных перемещений на основе стандартной оптической схемы, показанной на рис. 8. В первой итерации эксперимента в качестве анализирующей шкалы была использована симметричная дифракционная (с фактором заполнения 0,5). В этом случае путем оптической системы мы добиваемся нужной разности фаз для пары квадратурных сигналов в каналах 2 и 3, показанных на рис. 9. Фигура Лиссажу, построенная по этим сигналам и выведенная на экран осциллографа, также показана на рис. 9.



Рис. 8. Фотография макета датчика линейных перемещений

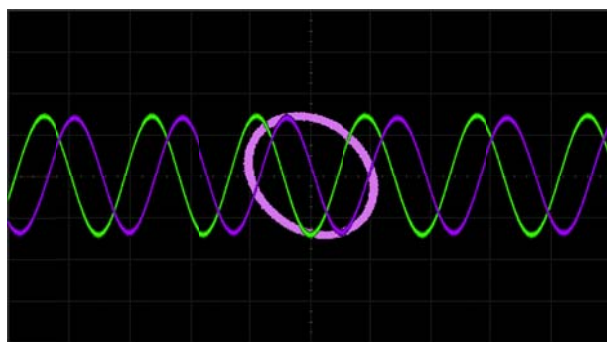


Рис. 9. Квадратурные сигналы, полученные с помощью стандартной схемы

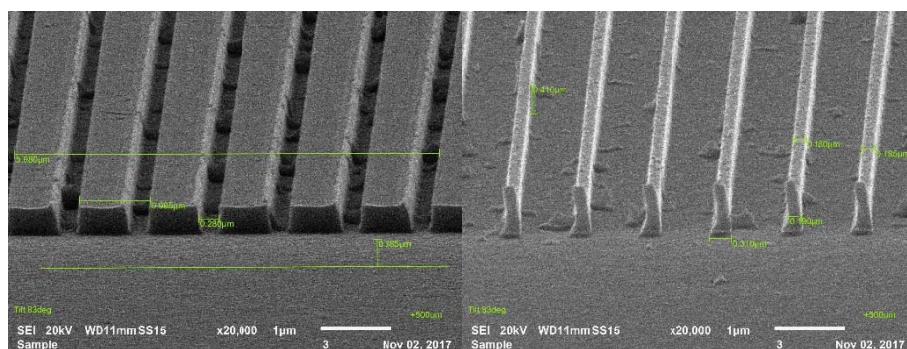


Рис. 10. Изображения анализирующих шкал, полученные с электронного микроскопа с фактором заполнения 0,25 и 0,75

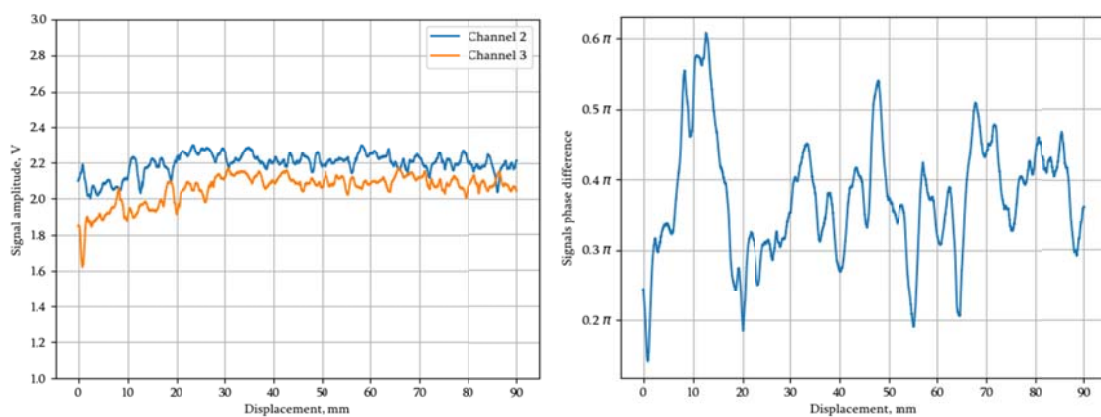


Рис. 11. Измеренные амплитуды и разность фаз квадратурных сигналов в 1 и 2 каналах при использовании стандартных решеток в измерительной головке

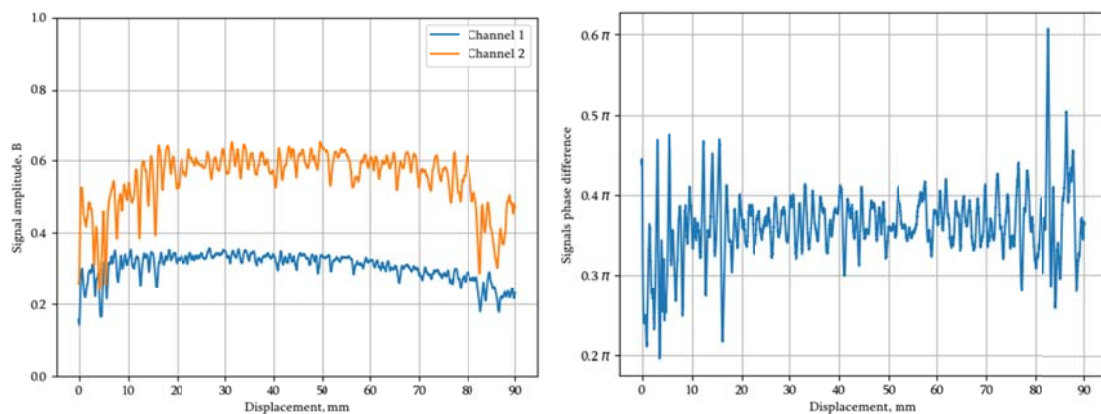


Рис. 12. Измеренные амплитуды и разность фаз квадратурных сигналов в 1 и 2 каналах при использовании структурированных решеток в измерительной головке

На второй итерации эксперимента, мы изготовили анализирующие шкалы с различным фактором заполнения, как показано на рис. 10, и установили их в систему датчика линейных перемещений. Параметры этих образов: период $1 \text{ мкм} \pm 3 \text{ нм}$, высота $400 \pm 50 \text{ нм}$, фактор заполнения 0,25 и 0,75. В этом случае удалось реализовать требуемую разность фаз пары квадратурных сигналов в каналах 1 и 2.

Для каждой из итераций эксперимента измерительная головка перемещалась вдоль кодирующей шкалы и были получены выходные данные в виде квадратурных сигналов. При анализе результатов мы вычисляли экстремумы полученных сигналов, их амплитуды и разности фаз между ними, как показано на рис. 11 и 12 соответственно первой и второй итерациям.

Заключение

Использование дифракционной решетки с особыми параметрами микрорельефа в измерительной головке датчика линейных перемещений позволяет нам: 1) уменьшить размеры рабочей зоны на измерительной шкале, 2) уменьшить зависимость разрешения и погрешности измерения от неточностей юстировки измерительной головки относительно шкалы, 3) снизить требования к относительному углу расположения измерительной головки и шкалы и 4) добиться высокой стабильности квадратурных сигналов перемещения (то есть достичь высокого разрешения и низкой погрешности) в процессе измерения.

Благодарности

Работа выполнена в МГТУ им. Н. Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта государственного заказа № 3.2236.2017/4.6.

Список источников

- [1] **Zherdev, A. Y.** Optical position encoder based on four-section diffraction grating / A. Y. Zherdev, S. B. Odinokov, D. S. Lushnikov, V. V. Markin, O. A. Gurylev, M. V. Shishova // SPIE Conference Proceeding. — 2017. — Vol. 10233. — P. 102331I.
- [2] **Lushnikov, D. S.** The small-sized ultraprecision sensor for measuring linear displacements / D. S. Lushnikov, A. Y. Zherdev, S. B. Odinokov, V. V. Markin, O. A. Gurylev, M. V. Shishova // SPIE Conference Proceeding. — 2017. — Vol. 10329. — P. 103293E. — DOI: 10.1117/12.2269712.
- [3] **Shishova, M. V.** Mathematical modeling of signal transfer process into linear displacement encoder optical system / M. V. Shishova, S. B. Odinokov, D. S. Lushnikov, A. Y. Zherdev, O. A. Gurylev // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 201. — P. 623–629. — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.676.
- [4] **Gao, W.** Measurement technologies for precision positioning / W. Gao, S. W. Kim, H. Bosse, H. Haitjema, Y. L. Chen, X. D. Lu, W. Knapp, A. Weckenmann, W. T. Estler, H. Kunzmann // CIRP Annals: Manufacturing Technology. — 2015. — Vol. 64. — № 2. — P. 773–796.
- [5] **Munnig Schmidt, R.** Ultra-precision engineering in lithographic exposure equipment for the semiconductor industry / Robert-H. Munnig Schmidt // Phil. Trans. R. Soc. A. — 2012. — № 370. — P. 3950–3972. — DOI: 10.1098/rsta.2011.0054.
- [6] **Rozman, J.** Linear Optical Encoder System with Sinusoidal Signal Distortion Below –60 dB / J. Rozmxn, A. Pleteršek // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2010. — Vol. 59. — № 6.
- [7] **Teimel, A.** Technology and applications of grating interferometers in high-precision measurement / A. Teimel // Precision Engineering. — 1992. — Vol. 14. — № 3. — P. 147–153.
- [8] **Li, X.** Fabrication of scale gratings for surface encoders by using laser interference lithography with 405 nm laser diodes / X. Li, Y. Shimizu, S. Ito et al. // Int. J. Precis. Eng. Manuf. — 2013. — Vol. 14. — Is. II. — P. 1979–1988. — DOI: 10.1007/s12541-013-0269-6.
- [9] **Fan, S.** A study on the fabrication of main scale of linear encoder using continuous roller imprint method / S. Fan, Y. Shi, L. Yin, L. Feng, H. Liu // SPIE Proceedings. — 2013. — Vol. 8916. — P. 3W.

Optical Position Encoder based on Structured Head Diffraction rating

A. Y. Zherdev, S. B. Odinokov, D. S. Lushnikov, V. V. Markin, M. V. Shishova
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Optical position encoders working according to the interference method consists of a measurement scale and a measuring head moving along each other. The scale has a reflection diffraction grating on its surface and the measuring head has a transmission diffraction grating with same period inside. Laser light passing and diffracting through these two gratings creates an interference signal on an optical detector. Decoding of the interference signal phase allows to determinate current position. Known optical position encoders use complex optical schemes and some phase optical elements to form several quadrature signals with different phase for higher encoder accuracy. Previously we researched such kind of schemes [1, 2]. In this paper we propose to use a common optical scheme without phase elements but with a complex structured measuring head grating for this purpose to simplify an optical scheme and alignment requirements. The optical scheme of position encoder based on measuring head grating with specific structure is research and described in this paper.

Keywords: Optical position encoder, Optical displacement sensor, Precision position sensor, Linear encoder, Diffraction grating.