

# Математическое моделирование процесса передачи сигнала в оптической системе датчика линейных перемещений

М.В. Шишова<sup>а</sup>, С.Б. Одинок<sup>а</sup>, Д.С. Лушников<sup>а</sup>, А.Ю. Жердев<sup>а</sup>, О.А. Гурылев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Россия

## Аннотация

Рассматривается возможность применения прецизионных дифракционных решеток в оптической системе линейного энкодера. Анализ интерференционного поля проводится с целью математического моделирования процесса преобразования сигнала в системе. Исследуется сохранение фазовых соотношений в генерируемых сигналах при малом смещении подвижной решетки, приводящих к изменению интенсивности света в рабочем направлении. Представлен макет датчика, разработанный на основе исследуемой оптической системы.

**Ключевые слова:** датчики линейных перемещений; оптические энкодеры; датчики интерференционного типа; дифракционные решетки; дифракционные оптические элементы

## 1. Введение

Высокие требования к точности перемещений обуславливают необходимость применения ультрапрецизионных датчиков различных типов в современных прецизионных устройствах. На сегодняшний день измерения перемещений с нанометровой погрешностью обеспечиваются энкодерами открытого типа, работающими на основе интерференционного метода. Отличает этот метод применение высокочастотной дифракционной решетки в качестве эталонной шкалы, которая перемещается относительно оптической головки датчика с другой дифракционной решеткой-шкалой. Конструкции подобных измерителей строятся на основе оптической интерференционной схемы. В работе исследуется один из вариантов подобных схем, где в качестве делителя пучка применяется пропускающая фазовая дифракционная решетка, как показано на рис. 1. При симметричном профиле рельефа можно добиться высоких и равных эффективностей в «+1» и «-1» порядках дифракции при нормальном падении излучения на шкалу, что повысит контраст анализируемого интерференционного поля.

Исследуемый принцип измерения перемещения основан на внесении фазового сдвига в интерференционный сигнал. Модуляция фазы при этом обеспечивается смещением одной высокочастотной дифракционной решетки относительно другой. Распределение интенсивности в плоскости каждого из четырех фотоприемников представляет собой гармоническую функцию координаты смещения. Данная работа посвящена определению этих зависимостей.

## 2. Описание оптической схемы

К настоящему моменту в литературе представлено множество различных интерферометрических оптических схем, применяемых в энкодерах [2–5]. В данной работе математически описывается процесс передачи оптического сигнала в схеме, показанной на рис. 1. Излучение от лазерного светодиода с длиной волны  $\lambda = 660$  нм коллимируется с помощью объектива 1 и диафрагируется (2). Затем делится по амплитуде на пропускающей фазовой дифракционной решетке 3 с частотой 1000 лин/мм и преобразуется на отражательной дифракционной решетке 4 с такой же частотой. Далее излучение с помощью решетки 3 перенаправляется в приемники излучения 5–8, в плоскости каждого из которых наблюдается интерференция.

## 3. Анализ хода лучей

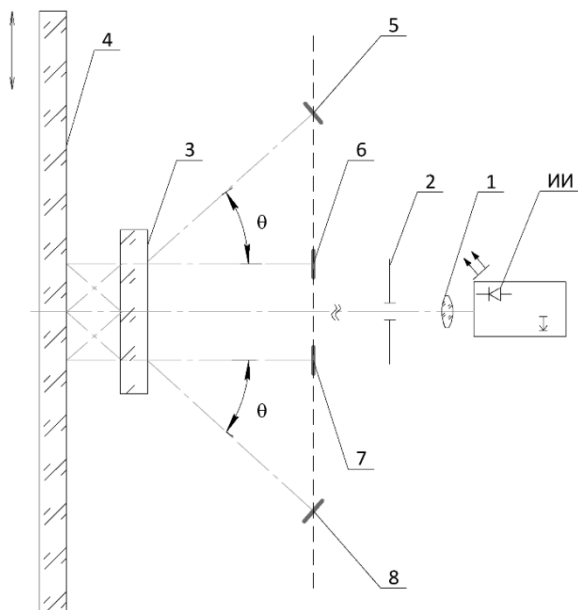
Взаимодействие компонентов оптической схемы иллюстрирует рис. 2. Схема показана развернуто, чтобы избежать путаницы [1].

Излучение от светодиода после прохождения пропускающей дифракционной решетки (ДР 1) распространяется в трех направлениях: «+1» и «-1» порядках дифракции, а также в пропускном («0» порядок). ДР 1 сконструирована таким образом, чтобы прошедший луч опережал дифрагировавшие по фазе на величину  $\varphi$ . Далее излучение дифрагирует на отражательной дифракционной решетке (ДР 2), выполняющей роль шкалы в датчике. ДР 2 подвижна, и вносит фазу  $2\pi$  при перемещении на один период  $d$ . Тогда при перемещении на величину  $x$  внесенная фаза равна:

$$\Omega = \frac{2\pi x}{d},$$

причем данный сдвиг фазы прибавляется к текущему при дифракции в положительном направлении ( $+\Omega$ ) и вычитается при дифракции в отрицательном ( $-\Omega$ ). После прохождения ДР 2 происходит повторное преобразование излучения на ДР 1. В прошедшие пучки снова вносится положительная фаза  $\varphi$ . Таким образом, волны, распространяющиеся в одном

направлении, интерферируют в плоскости фотодиодов. В предложенной оптической схеме в силу симметрии обеспечивается равенство оптических путей интерферирующих пучков. На практике геометрическая разность хода не должна превышать нескольких микрометров.



ИИ — источник излучения; 1 — коллиматор; 2 — дифрагма; 3 — пропускающая фазовая дифракционная решетка с периодом  $d$ ; 4 — отражательная фазовая дифракционная решетка с периодом  $d$ ; 5–8 — фотодиоды;  $\theta$  — угол дифракции в « $\pm 1$ » порядках

Рис. 1. Оптическая схема датчика линейных перемещений в меридиональном сечении.

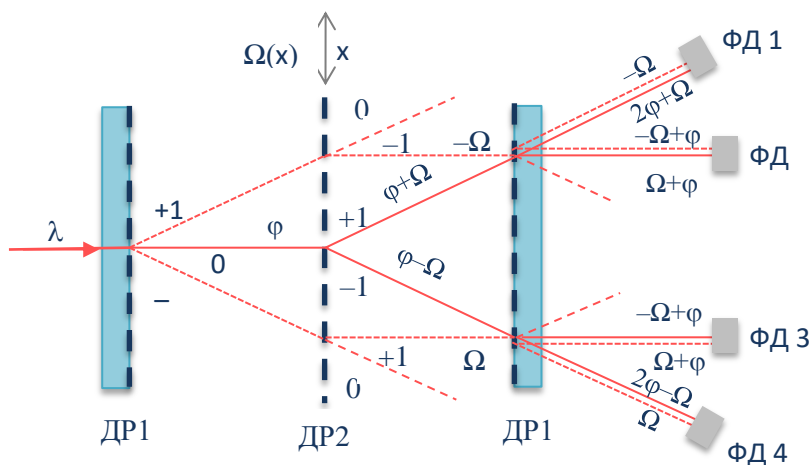


Рис. 2. Ход лучей вразвернутой оптической схеме.

В направлении «+1» порядка дифракции интерферируют волны со сдвигами фаз  $-\Omega$  и  $2\varphi + \Omega$ , «0» порядке интерферируют две волны со сдвигами фаз  $-\Omega + \varphi$  и  $\Omega + \varphi$  и в направлении «-1» порядка дифракции интерферируют волны со сдвигами фаз  $\Omega$  и  $2\varphi - \Omega$ . Наблюдаем постоянство разности фаз. Каждый сигнал может быть представлен функцией комплексной амплитуды:

$$U = U_{\max} \exp(i\psi).$$

Амплитудный множитель  $U_{\max}$  в каждом из случаев формируется путем деления амплитуды исходного излучения в соответствии с дифракционными эффективностями и коэффициентами пропускания по ходу распространения излучения. Предположим, что дифракционные решетки формируют равномерное распределение в порядки дифракции. Поэтому будем рассматривать интерференцию нормированных волн.

Результирующая интенсивность двух интерферирующих волн с амплитудами  $U_A = |U_A| \exp(i\psi_A)$  и  $U_B = |U_B| \exp(i\psi_B)$  определяется известным соотношением:

$$I = U \cdot U^* = |U_A|^2 + |U_B|^2 + 2|U_A||U_B|\cos(\psi_B - \psi_A)$$

Тогда:

1) Результирующая комплексная амплитуда и соответствующая интенсивность в «+1» порядке (ФД 1):

$$U_{+1} = \exp[-i\Omega] + \exp[i(2\varphi + \Omega)], \quad I_{+1} = U_{+1} \cdot U_{+1}^* = 2[1 + \cos(2\Omega + 2\varphi)] = 2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{4\pi x}{d} + 2\varphi\right) \right].$$

2) Результирующая комплексная амплитуда и соответствующая интенсивность в «0» порядке (ФД 2):

$$U_0 = \exp[i(\varphi - \Omega)] + \exp[i(\varphi + \Omega)], \quad I_0 = U_0 \cdot U_0^* = 2[1 + \cos(2\Omega)] = 2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{4\pi x}{d}\right) \right].$$

3) Результирующая комплексная амплитуда и соответствующая интенсивность в «0» порядке (ФД 3):

$$U_{0'} = \exp[i(\varphi - \Omega)] + \exp[i(\varphi + \Omega)], \quad I_{0'} = U_{0'} \cdot U_{0'}^* = 2[1 - \cos(2\Omega)] = 2 \left[ 1 - \cos\left(\frac{4\pi x}{d}\right) \right].$$

4) Результирующая комплексная амплитуда и соответствующая интенсивность в «-1» порядке (ФД 4):

$$U_{-1} = \exp[i\Omega] + \exp[i(2\varphi - \Omega)], \quad I_{-1} = U_{-1} \cdot U_{-1}^* = 2[1 + \cos(2\Omega - 2\varphi)] = 2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{4\pi x}{d} - 2\varphi\right) \right].$$

При обеспечении вносимой фазы  $\varphi = \pi/4$  получаем равномерную локализацию четырех сигналов по периоду, как показано на рис. 3. Фигура Лиссажу получаемая от сигналов  $I_{+1}$  и  $I_0$  имеет форму окружности (разность фаз равна  $\pi/2$ ).

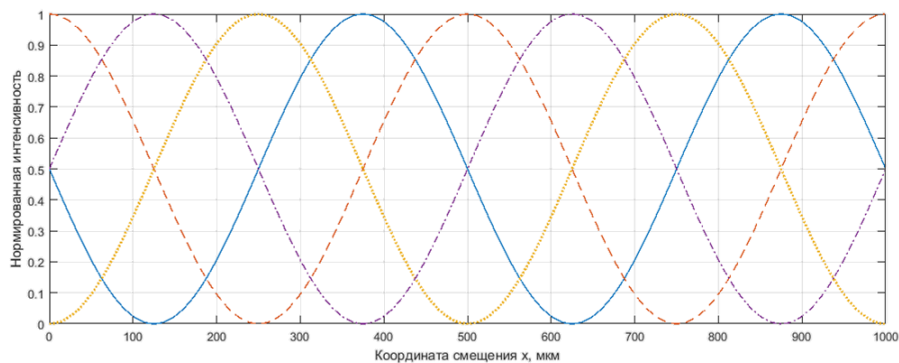


Рис. 3. Получаемые нормированные сигналы.

Применение дифракционной решетки для модуляции сигнала переносит его в область частот вдвое выше исходной. Тогда период функции перемещения будет в два раза меньше периода эталонной шкалы ( $d/2$ ). Фотодиоды создают сдвинутые по фазе гармонические сигналы напряжения, соответствующие вычисленным интенсивностям, которые при дальнейшем усилении и оцифровке могут быть интерполированы с высокой степенью точности.

#### 4. Экспериментальные результаты

Описанная оптическая схема воплощена в макете датчика линейных перемещения. Фотография стенда по контролю параметров оптических сигналов представлена на рис. 4. Характеристики макетного образца исследуются в сравнении с зарубежным аналогом оптического энкодера открытого типа фирмы Heidenhain. Контроль параметров полученных интерференционных сигналов на первом этапе производится с помощью осциллографа. На рис. 5 показаны экспериментально полученные сигналы. Эллиптическая форма фигуры Лиссажу свидетельствует о сохранении постоянства разности фаз.

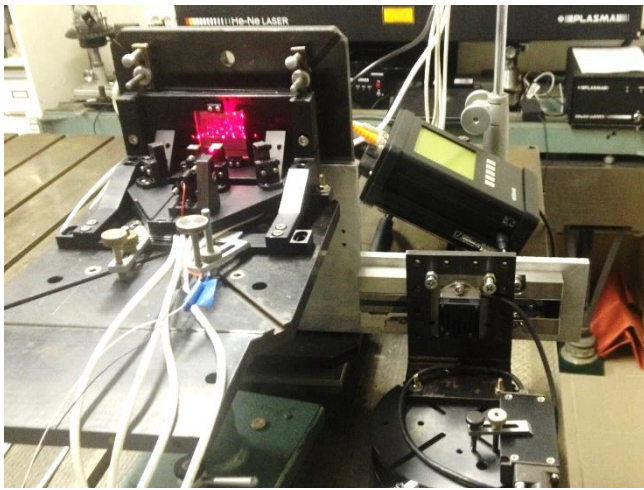


Рис. 4. Макет датчика линейных перемещений.

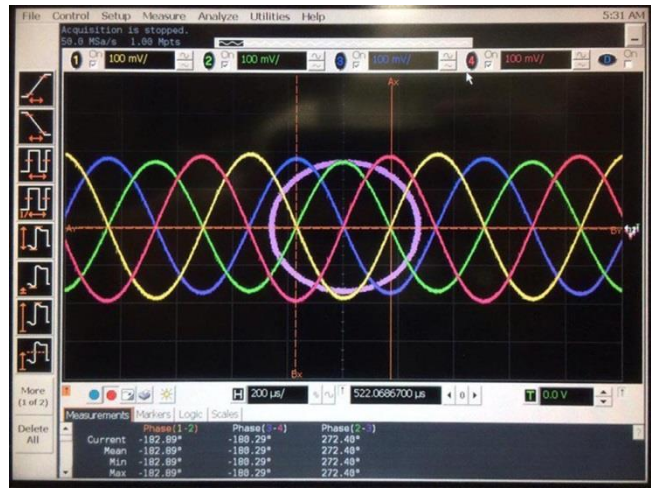


Рис. 5. Изображение сигналов на осциллографе.

## 5. Заключение

Полученные зависимости сигнала перемещения согласуются с экспериментальными данными. Задача установления допустимых погрешностей в оптической системе датчика линейных перемещений может быть решена с применением модели дифракции в произвольной системе координат [6, 7].

## Благодарности

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0197 (ID RFMEFI57715X0197).

## Литература

- [1] Teimel, A. Technology and applications of grating interferometers in high-precision measurement // Precision Engineering. – 1992. – Vol. 14, No. 4.
- [2] Коротаяев, В.В. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Часть 1. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений: Учебное пособие / В.В. Коротаяев, А.В. Прокофьев, А.Н. Тимофеев. — СПб.: НИУ ИТМО, 2012. — 114 с.
- [3] Комоцкий, В.А. Исследование датчика линейных перемещений на основе двух фазовых дифракционных решеток / В.А. Комоцкий, В.И. Корольков, Ю.М. Соколов // Автометрия – 2006. – Т. 42, №6. – С. 105 – 112.
- [4] Jourlin, Y. Compact diffractive interferometric displacement sensor in reflection / Y. Jourlin, J. Jay, O. Parriaux // Precision Engineering – 2002. Vol. 26
- [5] Щеулин, А.С. Применение объемной голографической решетки в кристалле CaF<sub>2</sub> для измерения линейного перемещения с нанометровой точностью / А.С. Щеулин, А.Е.Агневакс, А.К. Купчиков, Е.Б. Верховский, А.И.Рысин // Оптика и спектроскопия – 2014.– Т. 17, №6. – С. 1005 – 1011.
- [6] Жердев, А.Ю. Модель дифракции излучения на дифракционной решётке в произвольной системе координат для анализа погрешностей расположения элементов оптических систем / А.Ю. Жердев, С.Б. Одинокоев, Д.С. Лушников, В.Е. Талалаев, М.В. Шишова // Голография. Наука и практика: 13-я международная конференция «ГолоЭкспо 2016»: Тезисы докладов. — 2016. — С. 291–294.
- [7] Гурылев, О.А., Одинокоев, С.Б., Лушников, Д.С., Жердев, А.Ю., Шишова, М.В. VI Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов, М.: НИЯУ МИФИ, 2017. — С. 280–281.