

# БЕСКОНТАКТНОЕ ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СМЕЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОЭ, ФОРМИРУЮЩИХ МОДУ БЕССЕЛЯ

В.В. Котляр, Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина  
Институт систем обработки изображений РАН

## Введение

Существуют немало оптических методов бесконтактного измерения линейных смещений. Наиболее известные - проекционный и интерферометрический. Проекционный метод позволяет измерять линейные смещения в диапазоне от 0,01 мм до 10<sup>3</sup> мм с точностью ~ 0,001 мм – 0,1 мм [1]. При этом используются измерительные микроскопы или длинномеры. Для достижения высокой точности измерений используются возможности человеческого глаза, что затрудняет автоматизацию этого метода. Автоматизированные системы, основанные на проекционном методе, позволяют определять линейные смещения с погрешностью около 0,01 мм [2, 3]. При этом с увеличением измеряемого смещения растет абсолютная ошибка измерения. Интерферометрический метод позволяет измерять линейные смещения в диапазоне от 10<sup>-4</sup> мм до 10<sup>-2</sup> мм с точностью ~ 10<sup>-4</sup> мм [4]. При этом абсолютная ошибка измерения практически не меняется. Как видно, эти два метода работают в совершенно разных диапазонах величин измеряемых линейных смещений. Между этими диапазонами есть довольно большой разрыв, то есть смещения, размер которых лежит в диапазоне от 10<sup>-2</sup> мм до 10<sup>-1</sup>мм, сложно измерять с помощью одного из этих методов. Необходим метод, который позволял бы измерять линейные смещения в этом диапазоне. В качестве такого метода в данной работе предлагается использование пучков, обладающих вращением вокруг оси распространения. Простейшие из них — суперпозиция двух бесселевых функций с разными показателями и масштабами. Для измерения линейных смещений рассмотрены вращающиеся бесселевы пучки, сформированные с помощью бинарных фазовых ДОЭ с пространственной несущей частотой [5,6].

## Эксперимент

ДОЭ устанавливается в оптическую схему (рис. 1), которая состоит из самого ДОЭ, He-Ne-лазера, зеркала и телекамеры, которая регистрирует пучок отраженный зеркалом. ДОЭ имеет размер 4×4мм, разрешение – 4×4 мкм, глубина фазовой решетки 1,26 мкм. При освещении ДОЭ гауссовым пучком на расстоянии  $z = \frac{R}{\tan \psi} \approx 4 \text{ мм}$ , где  $\psi$  - угол

наклона конической волны к оси распространения пучка, формируется почти бездифракционный вращающийся двухмодовый пучок Бесселя с номерами мод  $(n, m) = (-1, 0) + (2, 1)$ . В центральной части сечения пучка имеет место распределение интенсивности в виде трех пятен в диаметре каждый около 200 мкм.

Распределение интенсивности в сечении пучка вращается равномерно, и по известному периоду поворота и углу поворота можно определить линейное смещение зеркала  $\Delta l$ :

$$\Delta l = \Delta \varphi \frac{L}{\Phi} \quad (1)$$

где  $\Phi$  – угол повторения изображения,  $L$  – период расстояния вдоль оси повторения изображения,  $\Delta \varphi$  - угол поворота изображения. Причем угол повторения изображения совершенно необязательно должен быть равен  $2\pi$ , так как обычно изображение моды имеет несколько осей симметрии.

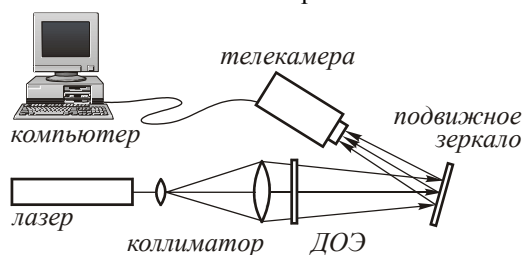


Рис. 1. Оптическая схема устройства для измерения линейных смещений.

Для определения линейных смещений в данном устройстве использовался ДОЭ с периодом повторения  $L=10$  мм. Этот ДОЭ строит изображение, которое имеет три оси симметрии. То есть угол повторения изображения равен  $\frac{2\pi}{3}$ . Был проведен эксперимент на упрощенной оптической схеме, которая приведена на рис. 2.

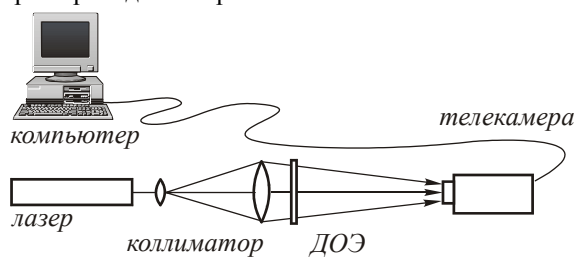


Рис. 2. Оптическая схема, используемая в эксперименте.

В ходе эксперимента телекамера смещалась микрометрическим винтом, и регистрировались изображения через 0,5 мм. Размерность регистрируемых изображений составляла 512×512 пикселей. Реальный размер изображения - около 0,5 мм. На рис. 3 приведены несколько таких изображений для смещений 0 мм, 0,5мм, 1мм и 1,5мм

Из-за расплывчатых краев светлых пятен изображения точное измерение угла поворота невозможно. Для измерения угла поворота определялись координаты центра тяжести светлых пятен  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{A^2} \int_0^A \int_0^A I(x,y) x dx dy \\ \bar{y} &= \frac{1}{A^2} \int_0^A \int_0^A I(x,y) y dx dy \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A$  – размер изображения,  $I(x,y)$  – функция яркости изображения.

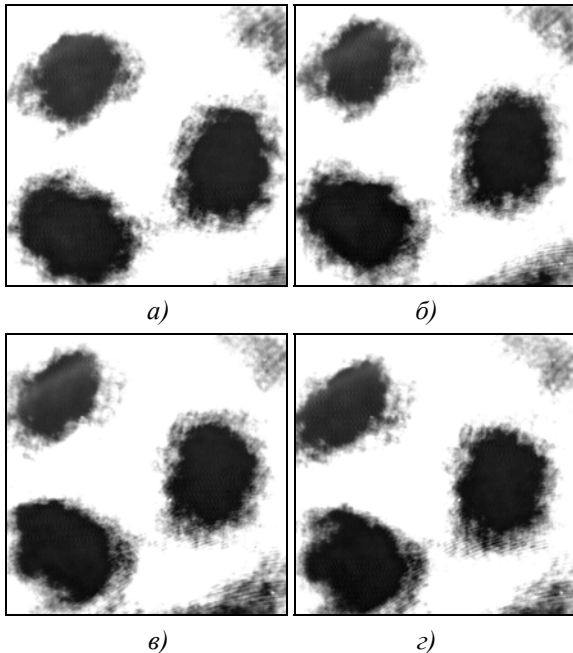


Рис. 3. Информативная часть изображения в исходной плоскости (а), со смещением 0,5 мм (б), со смещением 1 мм (в), со смещением 1,5 мм (г).

Затем определялось среднее расстояние от центров светлых пятен до центра тяжести по формуле между отрезками, которые соединяют точку  $\bar{x}, \bar{y}$  и границы пятна в кольце.

$$\bar{r} = \frac{1}{A^2} \int_0^A \int_0^A I(x,y) \sqrt{(x-\bar{x})^2 + (y-\bar{y})^2} dx dy. \quad (3)$$

На исходном изображении выделялось узкое кольцо с центром в  $\bar{x}, \bar{y}$  и радиусом  $\bar{r}$  (рис. 4). На этом кольце определялись границы одного из пятен. Направлением на пятно считается биссектриса угла.

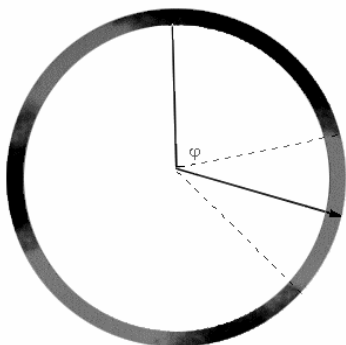


Рис. 4. Измерение угла поворота по обработанному изображению.

На рис. 5 представлены графики функции средней интенсивности измеряемой в кольце с радиусом  $\bar{r}$  для двух плоскостей измерения, расстояние между которыми составляет 0,5 мм.

Всего в ходе эксперимента проведено 20 смещений на 0,5 мм. Было установлено, что минимально определяемое угловое смещение составляет 0,08 или 3,8% от периода, тогда минимально

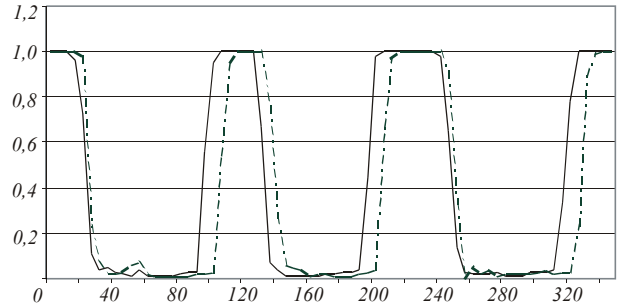


Рис. 5. Графики функции средней интенсивности в зависимости от угла, который отсчитывается от центра тяжести.

определяемое смещение составляет 0,38 мм. Так как теоретически размер периода можно существенно уменьшить, то соответственно будет уменьшаться и размер минимального смещения, которое можно определить в данном устройстве. Был проведен вычислительный эксперимент, в котором моделировалась работа оптической схемы на рис. 2. В ходе эксперимента был рассчитан ДОО с следующими параметрами: размер элемента – 2 мм, размерность матрицы отсчетов для ДОО 1024×1024 период полного поворота – 0,2 мм, число светлых пятен в информативной части изображения – 3.

На рис. 6 показаны несколько изображений полученных в вычислительном эксперименте для смещений 0 мм, 0,1 мм, 0,2 мм.

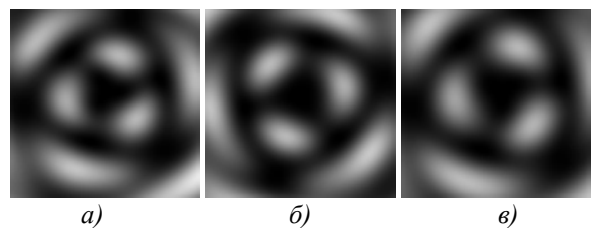


Рис. 6. Информативная часть изображения на исходной плоскости (а), со смещением 0,1 мм (б), со смещением 0,2 мм (в).

Размер изображения 0,5 мм. Погрешность измерения линейного смещения (или минимально обнаруживаемое смещение) составляет 2,5% от периода или 0,005 мм. Эта погрешность сопоставима с погрешностью проекционного метода [2]. При этом расстоянии, на котором пучок сохраняет свою структуру, составляет 12 мм. То есть максимальное смещение, которое может быть измерено этим методом составляет 12 мм. Разрешение, которое необходимо для изготовления этого ДОО, составляет 2 мкм, что не является пределом для современной технологии изготовления ДОО. Так что в перспек-

тиве можно получить существенно меньшую погрешность для этого метода. К сожалению, возможности компьютера не позволяют провести вычислительный эксперимент для ДОЭ с меньшим периодом полного поворота. В качестве дополнительной возможности для уменьшения погрешности следует указать возможность измерения угла поворота усредненного по нескольким светлым пятнам.

#### ***Заключение***

Проведенные исследования подтверждают перспективность использования фазовых ДОЭ, формирующих вращающиеся пучки в измерительной технике. Особый выигрыш в точности измерения достигается в диапазоне измерений от  $10^{-3}$  мм до  $10^{-1}$  мм.

#### ***Литература***

1. Афанасьев В.А. Оптические измерения // М., Высшая школа, 1981. 229 с.
2. Друян Ю.А. и др.// Электронная промышленность. 1986. N6. С. 44.
3. Маслюков Ю.С. Определение предельных погрешностей измерительных систем с преобразователями на приборах с зарядовой связью // Опτικο-механическая промышленность.-1990. N4. С. 70-73.
4. Борыняк Л.А., Краснопевцев Е.А., Логинов А.В., Штыгашев А.А. Точность определения перемещений в голографических интерферометрах // Автометрия. 1992. N6. С. 62-74.
5. Paakkonen P., Lautanen J., Koukenen M., Ruittinen M., Turunen J., Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Friberg A.T. Rotating optical fields: experimental demonstration with diffractive optics // J. Mod. Opt., 1998/ V. 45, N11. P. 2355-2369.
6. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Lautanen J., Koukenen M., Turunen J. Generating a couple of rotating nondiffracting beams using a binary-phase DOE // Optik, 1999. V. 110, N3. P. 137-144.

# Non-contact precision measurement of linear displacements using DOEs that generate Bessel modes

V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, S.N. Khonina  
Image Processing Systems Institute of RAS, Samara

## Abstract

The non-contact measurement of linear displacements can be performed by numerous optical methods. The most well-known methods are the projection and interferometric methods. The projection method allows to measure linear displacements in the range from 0.01 mm to 103 mm with the accuracy of  $\sim 0.001$  mm - 0.1 mm [1]. In this case, measuring microscopes or length gages are used. Human eyesight is required to achieve high accuracy of measurements, and this hampers the automation of the method. Automated systems based on the projection method allow to determine linear displacements with an accuracy of about 0.01 mm [2,3]. In this case, the absolute measurement error increases together with the growth of the measured displacement. The interferometric method allows to measure linear displacements in the range from  $10^{-4}$  mm to  $10^{-2}$  mm with an accuracy of  $\sim 10^{-4}$  mm [4]. In this case, the absolute measurement error remains practically unchanged. These two methods cover the absolutely different ranges of the measured linear displacements. There remains quite a large gap between these ranges, that is, the displacements with the size from  $10^{-2}$  mm to  $10^{-1}$  mm are difficult to measure using one of these methods. A method is required to measure linear displacements in this range. This work proposes to use for this purpose the beams rotating around the propagation axis. The simplest of such beams is the superposition of two Bessel functions with different features and scales. The rotating Bessel beams, generated by binary phase DOEs with a spatial carrier frequency, are considered as a means for measuring linear displacements [5, 6].

*Citation:* Kotlyar VV, Skidanov RV, Khonina SN. Non-contact precision measurement of linear displacement using DOEs that generate Bessel modes. *Computer Optics* 2001; 21: 102-104.

## References

- [1] Afanasyev VA. Optical measurements. Moscow: "Vysshaya Shkola" Publisher; 1981.
- [2] Druyan YA, et al. [In Russian]. *Elektronnaya Promyshlennostj* 1986; 6: 44.
- [3] Maslyukov YS. Estimation of the limiting errors of measuring systems with transducers on charge-coupled devices [In Russian]. *Optiko-Mehanicheskaya Promyshlennostj* 1990; 4: 70-73.
- [4] Borynyak LA, Krasnopevtsev EA, Loginov AV, Shtygashev AA. Accuracy of determining displacements in holographic interferometers [In Russian]. *Avtometriya* 1992; 6: 62-74.
- [5] Paakkonen P, Lautanen J, Koukenen M, Ruitinen M, Turunen J, Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Friberg AT. Rotating optical fields: experimental demonstration with diffractive optics. *J Mod Opt* 1998; 45(11): 2355-2369.
- [6] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Lautanen J, Koukenen M, Turunen J. Generating a couple of rotating non-diffracting beams using a binary phase DOE. *Optik* 1999; 110(3): 137-144.