

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОСВЕЩАЕМОГО СФЕРИЧЕСКИМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ ОПТИЧЕСКОГО РАСТРА

А. Н. ИВАНОВ¹, Ю. В. ФЕДОРОВ²

¹Филиал АО «Корпорация „Комета“» — Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения,
194021, Санкт-Петербург, Россия,
E-mail: i_off@mail.ru

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Представлен новый метод измерения линейных перемещений, основанный на освещении оптического растра сферическим волновым фронтом, сформированным с помощью точечного отверстия. Предложенный метод позволяет измерять перемещение растра с погрешностью порядка 0,001 %. Показано, что предложенная схема имеет большой коэффициент преобразования перемещения и позволяет регистрировать малое смещение растра.

Ключевые слова: дифракция, точечный источник, измерение линейных перемещений, оптический растр, сферический волновой фронт

Введение. В таких областях науки и техники, как современное машиностроение, приборостроение, робототехника и ряд других, необходимо точное измерение перемещений объектов и их линейных размеров. Примеры таких задач — контроль геометрической формы деталей, точное позиционирование обрабатывающего инструмента, контроль смещений элементов конструкции от номинального положения и др. Современные технологии требуют достижения субмикронных погрешностей при проведении линейных измерений, что ведет к необходимости разработки новых высокоточных методов измерения линейных перемещений, которые могут быть реализованы на практике.

В настоящее время наиболее высокой точностью обладают интерференционные измерители линейных перемещений [1, 2], однако они очень чувствительны к внешним воздействиям, например колебаниям температуры в воздушном тракте. Поэтому широкое распространение получили преобразователи линейных перемещений, использующие оптическое сопряжение двух растров [3, 4] и позволяющие измерять перемещения в диапазоне до 1 м с погрешностью 2—3 мкм. Основные их недостатки — необходимость точного позиционирования растров относительно друг друга и чувствительность к изменению температуры. В настоящей статье предложен метод измерения с использованием только одного растра, тепловая деформация которого не приводит к погрешности измерения.

Основные теоретические положения. В работах [5, 6] показана перспективность использования освещения объекта сферическим волновым фронтом для проведения линейных измерений теневым методом. В этом случае величина смещения границы теневой картины от края объекта в несколько раз превышает смещение самого объекта. Недостатком такого метода является значительная погрешность определения границы теневой картины.

В работе [7] предложен метод измерения, основанный на освещении щели сферической волной, сформированной на точечном отверстии. Показано, что при поперечном перемещении Δ щели относительно центра волнового фронта дифракционная картина Френеля сдвигалась на расстояние

$$\Delta' = \Delta(1 + z/R) = \Delta\Gamma, \quad (1)$$

где z — расстояние от щели до приемника, R — радиус кривизны падающего на щель волнового фронта, $\Gamma = (1 + z/R) = \Delta'/\Delta$.

Проведенные расчеты и эксперименты показали, что погрешность измерения перемещения щели определялась погрешностью измерения сдвига дифракционной картины и могла быть уменьшена до 0,01—0,015 % благодаря цифровой обработке дифракционной картины. Недостатком данного метода является малый диапазон измерения, ограниченный размером сечения светового пучка в плоскости щели, и малое значение коэффициента Γ , что обусловлено ограниченным размером матричного фотоприемника.

Для устранения этих недостатков предлагается заменить щель растром с шагом штрихов t . Функциональная схема измерителя линейных перемещений, реализующая освещение растра сферической волной, приведена на рис. 1, где 1 — лазер, 2 — объектив, 3 — точечное отверстие, 4 — растр, 5 — плоскость регистрации сигнала.

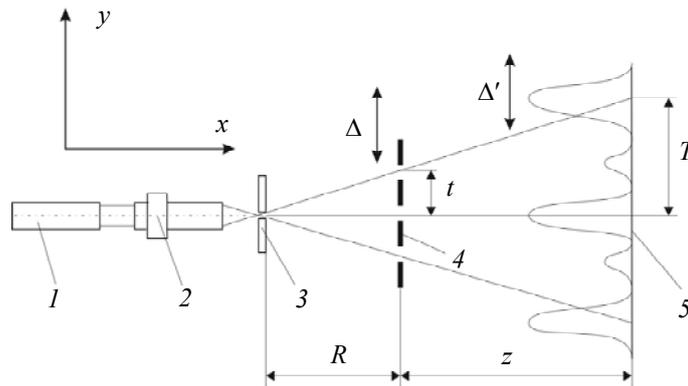


Рис. 1

Расчет дифракционной картины Френеля за растром показал, что она может приближенно описываться функцией вида

$$U(x, \Delta) = U_0 \sum_{n=0}^{N-1} \left[\exp \left\{ -i k n t \left(\frac{x}{z} + n \left(\frac{t}{2R} + \frac{t}{2z} \right) \right) \right\} \exp \left\{ -i k \Delta \left(\frac{\Delta}{2R} + \frac{\Delta}{2z} \right) \right\} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{sinc} \left(k a \left(x/z + n(t/R + t/z) + (\Delta/R + \Delta/z) \right) / 2 \right) \right], \quad (2)$$

где U_0 — амплитуда светового поля в плоскости растра, N — количество освещенных штрихов растра, k — волновое число, $a = t/2$ — ширина прозрачного штриха растра, t — период растра, Δ — перемещение растра по оси y .

В этом случае измеряемое перемещение Δ определяется только длиной растра $l = N_{\Sigma} t$, где N_{Σ} — количество штрихов растра.

Моделирование дифракционной картины показало, что, как и для одиночной щели, ее смещение может определено из выражения (1) при условии, что выполняется соотношение $2\lambda z/a = t(1 + z/R)$. В этом случае не происходит наложения максимумов дифракционной картины. На рис. 2 показан результат моделирования дифракционной картины от штрихов растра при $t = 66$ мкм, $R = 1,6$ мм, $z = 9,2$ мм в исходном ($\Delta = 0$) и смещенном ($\Delta = 5$ мкм) положениях.

Если размер прозрачного штриха растра t меньше диаметра светового пучка в плоскости растра, то на приемнике будут наблюдаться несколько главных дифракционных максимумов от освещенных штрихов. При смещении растра приемник будет регистрировать „бегущую“ дифракционную картину с периодом полос $T = t(1 + z/R)$ и диапазон измерения будет ограничен только длиной растра.

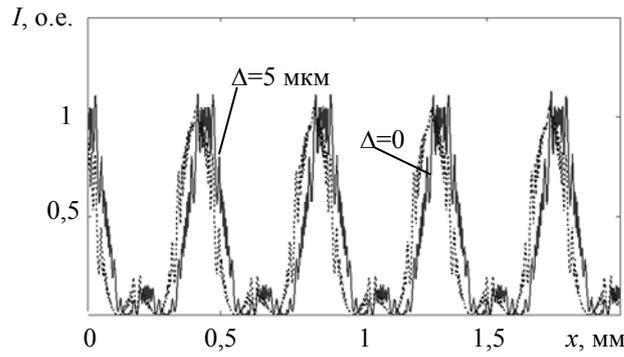


Рис. 2

Погрешность измерения величины перемещения раstra $\delta\Delta$ зависит от погрешности измерения величины смещения дифракционной картины и погрешности калибровки измерителя:

$$\delta\Delta = \pm\sqrt{(\delta\Delta'/\Gamma)^2 + (\Delta\delta\Gamma/\Gamma)^2}, \quad (3)$$

где $\delta\Delta'$ — погрешность измерения величины смещения дифракционной картины, $\delta\Gamma$ — погрешность оценки коэффициента преобразования перемещения в ходе калибровки, которая при использовании концевых мер высокого класса точности может достигать 10^{-4} — 10^{-5} .

При использовании методов регистрации, позволяющих оценить смещение дифракционной картины с погрешностью 0,1 пкс, возможно измерение перемещений с погрешностью порядка 0,001 — 0,005 %.

Результаты экспериментальных исследований. В соответствии с представленной на рис. 1 схемой был собран макет измерительной установки со следующими параметрами: $\lambda = 0,53$ мкм, апертура объектива $A = 0,05$, размер точечной диафрагмы $d = 10$ мкм, шаг раstra 16 лин/мм, размер пиксела матричного фотоприемника $p = 3,2$ мкм.

На первом этапе оценивалась практическая осуществимость схемы, изображенной на рис. 1. Растр закреплялся на линейном трансляторе и приводился в движение винтовым механизмом с шагом 1 мкм. На рис. 3, а, б приведены изображения дифракционных картин при $\Delta=0$ и $\Delta=20$ мкм соответственно.

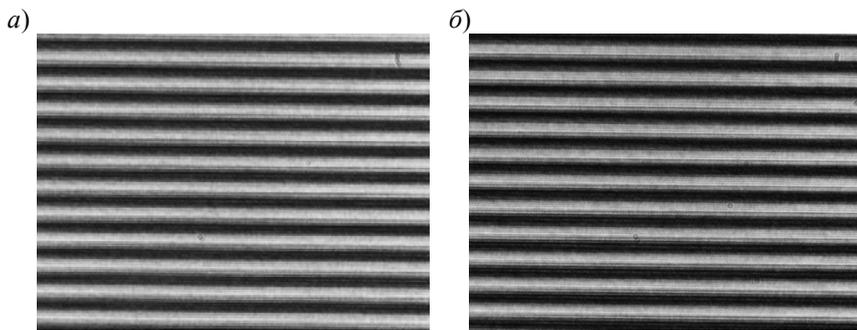


Рис. 3

Расчет коэффициента преобразования выполнялся с помощью концевой меры длиной $L = 12$ мм с погрешностью $\Delta L = \pm 0,4$ мкм. Она устанавливалась в специальное гнездо линейного транслятора, на котором крепился растр, что привело к смещению раstra на величину $\Delta = L$. После этого определялось количество целых дифракционных полос, на которые сместилась дифракционная картина: $m = [L/t]$. Суммарный сдвиг полос рассчитывался как $\Delta' = mT + \Delta'_{др} = 80,628$ мм, где дробная часть полосы $\Delta'_{др}$ и период полос T определялись из дифракционных картин. Коэффициент преобразования составил $\Gamma = \Delta'/L = 6,719$, а погрешность его измерения $\Delta\Gamma = \pm\sqrt{(\sqrt{(m+1)} \cdot \delta T/L)^2 + (\Gamma\delta L/L)^2} = \pm 2,5 \cdot 10^{-3}$, где погрешность из-

мерения периода полос и смещения полосы $\delta T = \delta \Delta'_{др} = \pm \sqrt{2} \cdot p / 2$. Измерение коэффициента преобразования позволяет устранить влияние погрешностей взаимного положения точечной диафрагмы, приемника и раstra на результат измерения.

После этого было выполнено измерение величины перемещения раstra в диапазоне от 1 до 10 мм с шагом 1 мм. Результаты измерений приведены в таблице. Расчетная погрешность измерения величины перемещения раstra определялась по формуле (3) и составила $\pm 3,8$ мкм на правой границе измеряемого диапазона.

Задаваемое смещение раstra, мм	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
Измеренное смещение раstra, мм	1,001	1,998	3,001	3,998	5,002	5,999	7,003	8,003	9,002	9,998

Заключение. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования показывают возможность создания измерителя линейных перемещений на базе предложенного метода. Метод отличается простой схемой реализации и высокой точностью измерения, при этом не предъявляются жесткие требования к погрешностям изготовления и установки раstra. Отклонение формы волнового фронта от идеальной сферы при дифракции волны на точечном отверстии описывается выражением $\Delta W = d^2 / \lambda R$ [8]. При указанных выше конструктивных параметрах установки погрешность, обусловленная отклонением формы волнового фронта, не превысит 0,3 мкм при перемещении раstra на 10 мм. При уменьшении размера точечного отверстия с 10 до 3 мкм вклад этой погрешности будет уменьшен на порядок. Недостатком схемы является необходимость жесткой фиксации осветительной части устройства относительно узла крепления раstra. Благодаря малым значениям параметров R и z измерительная схема очень компактна, причем ее размеры могут быть уменьшены посредством замены объектива с точечной диафрагмой на одномодовое волокно, на торце которого происходит дифракция лазерного излучения [9]. Дополнительного исследования требует вопрос использования некогерентных источников излучения, применение которых позволит увеличить параметр z и соответственно коэффициент преобразования Γ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dobosz M., Zamiela G. Interference fringe detection system for distance measuring interferometer // Optics & Laser Technology. 2012. Vol. 44. P. 1620—1628.
2. Benyong Chen et al. Development of a laser synthetic wavelength interferometer for large displacement measurement with nanometer accuracy // Optic Express. 2010. Vol. 3, N 18. P. 3000—3010.
3. Bo Zhao et al. A displacement measuring system based on grating double diffraction // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9446. P. 94464J-1—94464J-7.
4. Shuangshuang Zhao et al. Nanometer-scale displacement sensor based on phase-sensitive diffraction grating // Appl. Optics. 2011. Vol. 10, N 50. P. 1413—1416.
5. Fisher J., Radil T. Simple methods of edge position measurement using shadow projected on SSD sensor // Measurement Science Rev. 2003. Vol. 3. P. 37—40.
6. Fisher J., Radil T. Two-dimensional position measurement of objects with circular crosssection using single linear SSD sensor // Proc. of the XVIII Imeko World Congress; Imatra, Finland. 2006. P. 18—25.
7. Zakirov A. K. et al. Method of measuring linear displacements of objects based on Fresnel diffraction pattern position // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10334. P. 103340L-1—103340L-6.
8. Вознесенский Н. Б. и др. Интерференционный контроль асферических компонентов объектива для нанолитографии // ЖТФ. 2007. Т. 77, № 2. С. 126—130.
9. Климов А. Ю. и др. Источник сферической волны на основе зонда ближнепольного микроскопа // Изв. РАН. Сер. физическая. 2008. Т. 72, № 2. С. 221—223.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Иванов** — канд. техн. наук, доцент; Филиал АО «Корпорация „Комета“» — НПЦ ОЭЖН; E-mail: i_off@mail.ru
- Юрий Владимирович Федоров** — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник; Университет ИТМО, факультет систем управления и роботехники; E-mail: fedorovyv@yandex.ru

Поступила в редакцию
22.04.19 г.

Ссылка для цитирования: Иванов А. Н., Федоров Ю. В. Метод измерения линейных перемещений с помощью освещаемого сферическим волновым фронтом оптического раstra // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 654—658.

**METHOD OF LINEAR DISPLACEMENT MEASURING
USING OPTICAL RASTER ILLUMINATED BY SPHERICAL WAVE FRONT**

A. N. Ivanov¹, Yu. V. Fedorov²

¹ *Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems – the Branch of JSC Corporation „Cometa“, 194021, St. Petersburg, Russia
E-mail: i_off@mail.ru*

² *ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

A new method for measuring linear displacements based on illumination of optical raster by a spherical wave front formed by a point hole is presented. The proposed method allows to measure the raster movement with an error of about 0.001 %. It is shown that the proposed scheme has a large displacement transformation coefficient and allows to register small displacements of the raster.

Keywords: diffraction, point source, measurement of the linear displacement, optical raster, spherical wave front

REFERENCES

1. Dobosz M., Zamiela G. *Optics & Laser technology*, 2012, vol. 44, pp. 1620-1628.
2. Benyong Chen et al. *Optic Express*, 2010, no. 3(18), pp. 3000-3010.
3. Bo Zhao et al. *Proc. of SPIE*, 2015, vol. 9446, pp. 94464J-1-94464J-7.
4. Shuangshuang Zhao et al. *Applied Optics*, 2011, no. 10(50), pp. 1413-1416.
5. Fisher J., Radil T. *Measurement Science Review*, 2003, vol. 3, pp. 37-40.
6. Fisher J., Radil T. *Proceedings of the XVIII Imeko World Congress*, 2006, pp. 18-25.
7. Zakirov A.K. et al. *Proc. of SPIE*, 2017, vol. 10334, pp. 103340L-1-103340L-6
8. Voznesensky N.B., Gavrilov E.V., Kirillovskii V.K., Zhevlakov A.P., Orlov P.V. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2007, no. 2(52), pp. 271–275.
9. Klimov A.Yu., Rogov V.V., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2008, no. 2(72), pp. 204–206.

Data on authors

- Aleksander N. Ivanov** — PhD, Associate Professor; Scientific Design Center of Optoelectronic Surveillance Systems – the Branch of JSC Corporation Cometa; E-mail: i_off@mail.ru
- Yuriy V. Fedorov** — PhD, Senior Scientist; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: fedorovyv@yandex.ru

For citation: Ivanov A. N., Fedorov Yu. V. Method of linear displacement measuring using optical raster illuminated by spherical wave front. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 7. P. 654—658 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-654-658