

В. Н. НАЗАРОВ, Ю. А. СОКОЛОВ

ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МАСШТАБОМ СПЕКТРА ФУРЬЕ

Исследована возможность создания дифракционного метода контроля линейных и угловых перемещений объектов по схеме с изменяющимся масштабом их спектра Фурье. Представлена математическая модель, описывающая амплитудно-фазовое распределение света в плоскости регистрации, хорошо согласующаяся с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: дифракция, интерференция, дифракционные измерения.

Дифракционные методы контроля, применяемые при проведении угловых и линейных измерений [1, 2], основаны на получении и анализе дифракционной картины на объекте после его освещения излучением лазера. По этой информации судят о геометрических параметрах или пространственном положении объектов. Так измеряют, например, размеры отверстий, волокон, лент, проводов, контролируют профиль изделий, определяют оптические характеристики сред, проводят автоколлимационные измерения. Известно применение данного метода контроля и в медицине [2—5]. Это обусловлено рядом преимуществ дифракционных измерений перед традиционными: например, большей чувствительностью, простотой реализации, возможностью автоматизации.

Световое возмущение в плоскости регистрации часто описывается спектром Фурье функции амплитудного пропускания контролируемых объектов. Математический аппарат методов дифракции соответствует в этом случае приближению Френеля — Кирхгофа [6]. Для решения ряда задач используют также и геометрическую теорию дифракции [7]. В целом исследован ряд схем дифракционного контроля, определены их метрологические характеристики, составлены алгоритмы измерений.

Представляет интерес создание и исследование новых, не использованных ранее схем контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов — например, схема, приведенная на рис. 1. Предлагаемая система расширяет функциональные возможности схемы с изменяющимся масштабом спектра Фурье контролируемого объекта, размещенного между линзой и ее фокальной плоскостью [8]. Здесь с двух сторон от тонкой линзы l установлены объекты 2 и 3 в виде нитей. Как известно, по принципу Бабине, их можно заменить при дальнейшем анализе щелевыми апертурами. На систему под углом α падает плоский фронт волны коллимированного излучения He—Ne-лазера и освещает объект 2. На объект 3

падает сферический фронт. В задней фокальной плоскости 4 линзы образуется дифракционная картина, подобная картине дифракции на двух щелях. Расстояние между дифракционными полосами в главном максимуме определяется начальным углом ω , под которым сходятся нулевые порядки дифракции на щелях, и может быть приближенно оценено как $t = \lambda/\omega$.

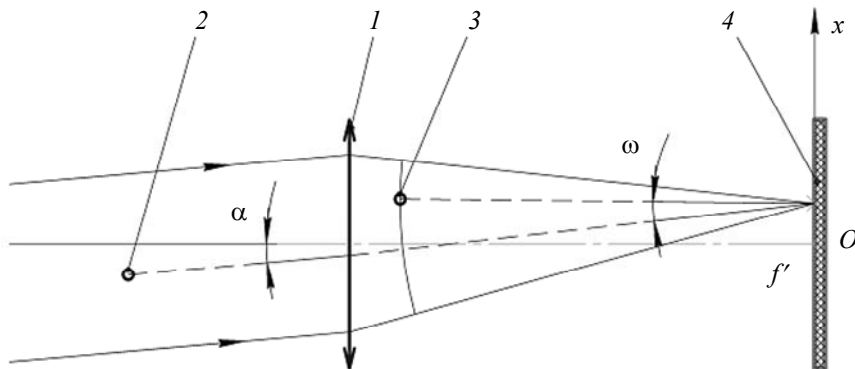


Рис. 1

При линейном смещении нитей 2 и 3 или изменении угла α падения света на линзу угол схождения ω нулевых порядков дифракции изменяется. Это приводит к изменению числа полос в дифракционной картине, смещения которых можно измерить, например, с помощью ПЗС-приемника, что позволяет контролировать положения объектов 2 и 3 или угла α .

Световое возмущение в фокальной плоскости 4 зависит от расположения объектов 2 и 3 относительно линзы. В работе [8] это учтено только для продольного расположения одиночных объектов вдоль оптической оси. Для практической реализации схемы необходимо учесть и поперечные смещения обоих объектов. Поэтому амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости от объекта 2 следует представить в виде приближения Фраунгофера следующим образом:

$$U_1(x) = \frac{\exp\left[\frac{jk}{2f'}x^2\left(1 - \frac{L}{f'}\right)\right]}{j\lambda f'} \int_{-a/2+v_1}^{a/2+v_1} \exp\left[-jk\xi\left(\frac{x}{f'} - \sin\alpha\right)\right] d\xi, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; f' — фокусное расстояние линзы; x — координата в фокальной плоскости линзы; L — расстояние от объекта 2 до линзы; a — размер объекта (диаметр первой нити); v_1 — смещение объекта от оси системы.

Множитель $\exp\left[\frac{jk}{2f'}x^2\left(1 - \frac{L}{f'}\right)\right]$ в формуле (1) учитывает фазовое искажение Фурье-образа, вызванное смещением нити из передней фокальной плоскости линзы.

Амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости от объекта 3, расположенного за линзой, также представим в виде приближения Фраунгофера. При этом необходимо учесть, что масштаб Фурье-спектра объекта зависит от расстояния до фокальной плоскости, а сам объект освещается сферической волной:

$$U_2(x) = \frac{1}{j\lambda d} \frac{f'}{d} \exp\left(\frac{jk}{2d}x^2\right) \int_{-b/2+v_2}^{b/2+v_2} \exp\left[-jk\xi\left(\frac{x}{d} - \frac{f'}{d}\sin\alpha\right)\right] d\xi, \quad (2)$$

где d — расстояние от объекта до экрана; b — размер объекта (диаметр второй нити); v_2 — смещение объекта от оси системы.

Амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости линзы от двух объектов представим в виде

$$U_{\Sigma}(x) = U_1(x) + U_2(x),$$

тогда интенсивность света в плоскости регистрации можно определить как

$$I(x) = U_{\Sigma}(x)U_{\Sigma}^*(x),$$

где $U_{\Sigma}^*(x)$ — величина, комплексно-сопряженная $U_{\Sigma}(x)$, или

$$I(x) = \left(\frac{1}{\pi f'} \right)^2 \left[\begin{aligned} & \left\{ a \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi a}{\lambda} \left(\frac{x}{f'} - \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \left(\frac{f'}{d} \right)^4 \left\{ b \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi b}{\lambda} \left(\frac{x}{d} - \frac{f'}{d} \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \\ & + 2ab \left(\frac{f'}{d} \right)^2 \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi a}{\lambda} \left(\frac{x}{f'} - \sin \alpha \right) \right] \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi b}{\lambda} \left(\frac{x}{d} - \frac{f'}{d} \sin \alpha \right) \right] \times \\ & \times \cos \left\{ \frac{\pi x^2}{\lambda d} \left[1 - \frac{d}{f'} \left(1 - \frac{L}{f'} \right) \right] + \frac{2\pi}{\lambda} \left[v_1 \left(\frac{x}{f'} - \sin \alpha \right) - v_2 \left(\frac{x}{d} - \frac{f'}{d} \sin \alpha \right) \right] \right\} \end{aligned} \right].$$

На рис. 2 представлены результаты расчета распределения интенсивности света в плоскости регистрации при следующих значениях параметров разработанной математической модели: $f' = 600$ мм; $\alpha = 9^{\circ}23'$; $a = b = 110$ мкм; $L = 12$ мм; $d = f'$; $v_1 = 0$; $v_2 = 1,7$ мм. Приведенные здесь же результаты экспериментальных исследований, представленные в виде фотоизображения дифракционной картины, хорошо согласуются с полученными ранее результатами теоретического анализа.

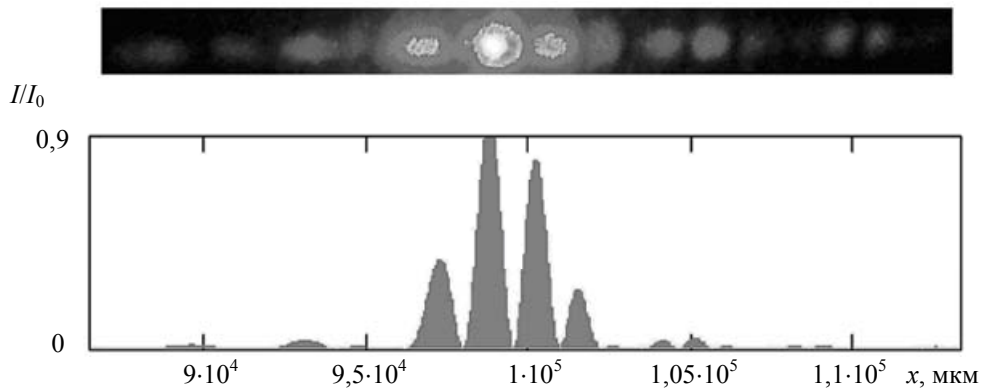


Рис. 2

В настоящее время достигнутое значение максимальной теоретической чувствительности рассмотренной системы к изменению угла α падения излучения составляет 0,01 с.

В дальнейшем представляется целесообразным изучение разработанной математической модели схемы дифракционного контроля пространственного положения объектов, исследование зависимостей параметров дифракционной картины от смещения объектов и угла падения света на них, поиск областей наибольшей чувствительности к таким изменениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В. Н., Линьков А. Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 2. С. 76—81.
2. Иваницкий Г. Р., Куниский А. С. Исследование микроструктуры объектов методами когерентной оптики. М.: Энергия, 1981.
3. Арефьев А. А., Старостенко Б. В. Определение показателя преломления оптически прозрачных сред дифракционным методом // Измерительная техника. 1986. № 5.
4. Иванов А. Н., Назаров В. Н. Использование муарового эффекта для создания высокоточных дифракционных схем контроля геометрических параметров объектов // Оптич. журн. 2010. Т. 77, № 4. С. 70—74.

5. *Ivanov A. N., Nazarov V. N.* Using the moiré effect to increase the accuracy of diffraction methods for monitoring the geometrical parameters and the spatial position of objects // *J. of Optical Technology*. 2009. Vol. 76, N 1. P. 39—42.
6. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970.
7. *Тарлыков В. А.* Лазерная дифрактометрия микрообъектов типовой формы: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб: СПбГУ ИТМО (ТУ), 2000.
8. *Гудмен Дж.* Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.

Сведения об авторах

Виктор Николаевич Назаров

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;
E-mail: naz_1946@mail.ru

Юрий Александрович Соколов

— студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;
E-mail: sokolov-juri@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
26.04.11 г.