

УДК 531.7.082.5: 535.42/.44

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ДИФРАКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МАСШТАБОМ СПЕКТРА ФУРЬЕ

В.Н. Назаров, Ю.А. Соколов

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

Ключевые слова: дифракция, интерференция, дифракционные измерения.

Введение

Дифракционные методы контроля находят широкое применение при проведении угловых и линейных измерений в научной и производственной практике [1, 2]. Они основаны на получении и анализе дифракционной картины за контролируемыми объектами после их освещения излучением лазера. По этой информации судят о геометрических параметрах или пространственном положении объектов. Таким образом измеряют, например, размеры отверстий, волокон, лент, проводов, контролируют профиль изделий, определяют оптические характеристики сред, проводят автоколлимационные измерения. Известно применение этого 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 дифракции соответствует в этом случае приближению Френеля–Кирхгофа [6]. Для решения ряда задач используют также и геометрическую теорию дифракции (ГТД) [7]. Исследован ряд схем дифракционного контроля, определены их метрологические характеристики, составлены алгоритмы измерений.

Представляет интерес создание и исследование новых, не использованных ранее схем этого метода, позволяющих увеличить чувствительность, точность контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов, расширить функциональные возможности метода.

Теоретические положения

В рамках данной работы исследуется схема дифракционного контроля, изображенная на рис. 1. Она расширяет функциональные возможности схемы с изменяющимся масштабом спектра Фурье контролируемого объекта, установленного между линзой и ее фокальной плоскостью [5].

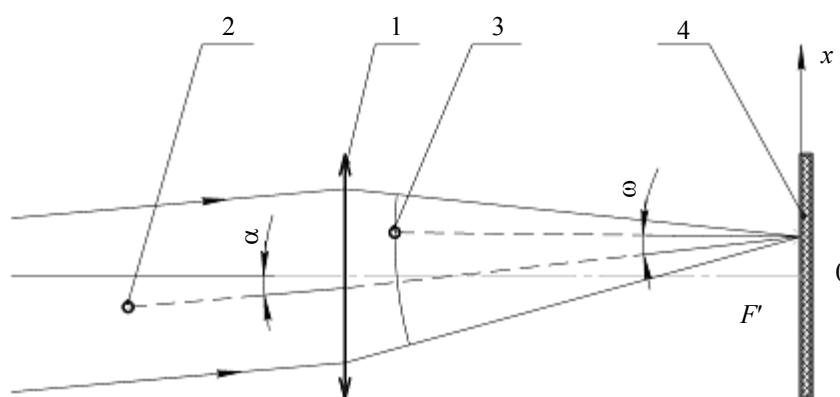


Рис. 1. Схема дифракционного контроля положений объектов 2 и 3 и угла падения излучения α

На рис. 1 с двух сторон от тонкой линзы 1 установлены объекты 2 и 3 в виде нитей. Как известно, по принципу Бабиня их можно заменить при дальнейшем анализе щелевыми апертурами. На систему под наклоном α падает плоский фронт волны коллимированного излучения He-Ne-лазера и освещает первый объект. На второй объект, расположенный за линзой, падает сферический фронт. В задней фокальной плоскости 4 линзы 1 образуется дифракционная картина, подобная картине дифракции от двух щелей. Расстояние между дифракционными полосами в главном максимуме определяется начальным углом

ω , под которым сходятся центральные лучи от каждой щели, и может быть приближенно определено как $t = \lambda/\omega$.

При линейном смещении нитей 2 и 3 или изменении угла α падения света на линзу 1 угол схождения ω лучей между направлениями на главные максимумы от каждой нити изменяется. Это приводит к изменению числа полос в дифракционной картине, смещения которых можно измерить, например, с помощью ПЗС-приемника. Это открывает возможность контроля положений объектов 2 и 3 или угла α падения излучения на систему.

Световое возмущение в фокальной плоскости 4 зависит от расположения объектов 2 и 3 относительно линзы 1. В [8] это учтено только для продольного расположения одиночных объектов вдоль оптической оси. Для практической реализации схемы необходимо учесть и поперечные смещения одновременно для двух объектов. Поэтому амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости 4 от первого объекта 2 следует представить в виде приближения Фраунгофера следующим образом:

$$U_1(x) = \frac{\exp[jk(z_1 + z_2)] \cdot \exp\left[\frac{jk}{2f}x^2\left(1 - \frac{L}{f}\right)\right]}{j\lambda f} \cdot \int_{-a/2+v_1}^{a/2+v_1} \exp\left[-jk\xi\left(\frac{x}{f} - \sin\alpha\right)\right] d\xi, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; z_1 и z_2 – расстояния, которые проходит излучение при наклонном падении света до линзы 1 и ее фокальной плоскости, соответственно (рис. 2); f – фокусное расстояние линзы; x – координата в фокальной плоскости линзы; L – расстояние от первого объекта до линзы; a – размер объекта (диаметр первой нити); v_1 – смещение объекта от оси системы; α – угол падения света на объект.

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

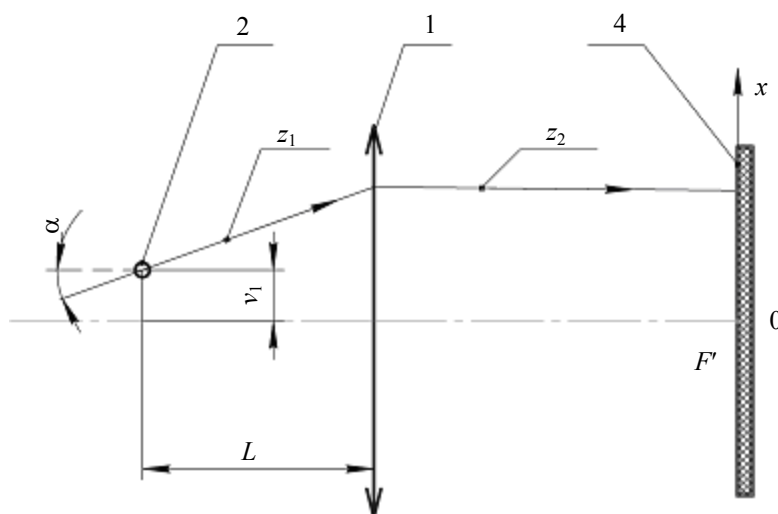


Рис. 2. Схема образования дифракционной картины от первого объекта

Амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости 4 от второго объекта 3, расположенного за линзой, тоже представим в виде приближения Фраунгофера (при этом необходимо учесть, что масштаб его Фурье-спектра зависит от расстояния до фокальной плоскости, а сам объект освещается сферической волной):

$$U_2(x) = \frac{\exp[jk(z_1 + z_2 - z_3)] \cdot \exp(jkz_3)}{j\lambda d} \cdot \frac{f}{d} \cdot \exp\left(\frac{jk}{2d}x^2\right) \cdot \int_{-b/2+v_2}^{b/2+v_2} \exp\left[-jk\xi\left(\frac{x}{z_3} - \frac{f}{z_3} \sin\alpha\right)\right] d\xi,$$

где $z_3 = \sqrt{d^2 + [f \cdot \tan(\alpha) - v_2]^2}$ – расстояние от объекта до центра дифракционной картины (рис. 3); d – расстояние от объекта до экрана; b – размер объекта (диаметр второй нити); v_2 – смещение объекта от оси системы.

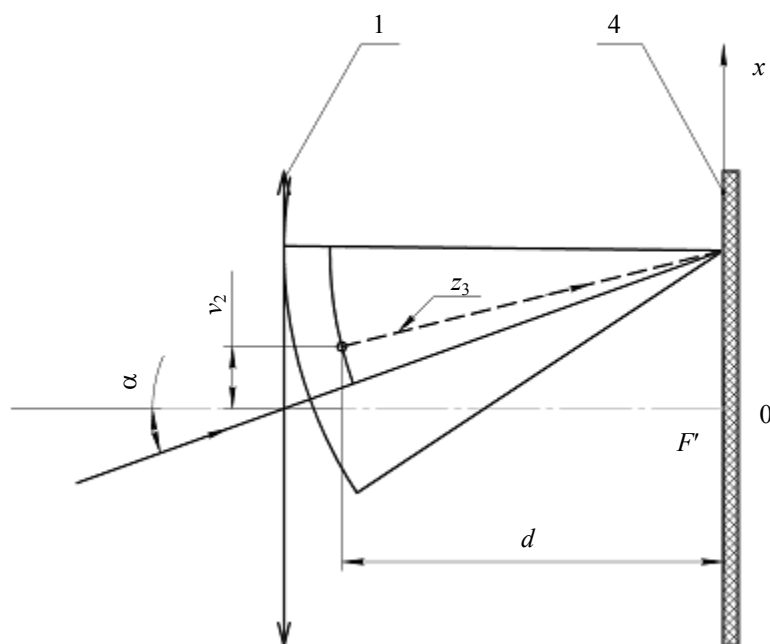


Рис. 3. Схема образования дифракционной картины от второго объекта

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 представить в виде

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

или

$$I(x) = \left(\frac{1}{\pi f} \right)^2 \left[\left\{ a \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi a}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \left(\frac{f}{d} \right)^4 \cdot \left\{ b \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi b}{\lambda} \left(\frac{x}{z_3} - \frac{f}{z_3} \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \right. \\ \left. + 2ab \left(\frac{f}{d} \right)^2 \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi a}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \cdot \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi b}{\lambda} \left(\frac{x}{z_3} - \frac{f}{z_3} \sin \alpha \right) \right] \cdot \right. \\ \left. \cdot \cos \left[\frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2}{d} \cdot \left[1 - \frac{d}{f} \left(1 - \frac{L}{f} \right) \right] + \frac{2\pi}{\lambda} \left[v_1 \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) - v_2 \left(\frac{x}{z_3} - \frac{f}{z_3} \sin \alpha \right) \right] \right] \right\} \right],$$

где $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$.

Результаты моделирования

На рис. 4, б, представлены результаты расчета распределения интенсивности света в плоскости регистрации при следующих значениях параметров разработанной математической модели: $f=600$ мм; $\alpha=9^\circ$; размеры нитей $a=b=110$ мкм; $L=12$ мм; $d=f$; $v_1=0$; $v_2=1,7$ мм. На рис. 4, а, представлена фотография дифракционной картины, полученная в ходе экспериментальных исследований цифровым фотоаппаратом, закрепленном на штативе. Эксперименты проводились на базе оптической скамьи ОСК-2 с установленной на ней линзой с указанным фокусным расстоянием. Источником излучения служил He-Ne-лазер, работающий в одномодовом режиме. В качестве объектов 2 и 3 по схеме рис. 1 использовались проволоки диаметром 110 мкм, жестко зафиксированные при указанных в модели геометрических параметрах схемы. Следует отметить хорошее совпадение экспериментальных результатов с полученной математической моделью.

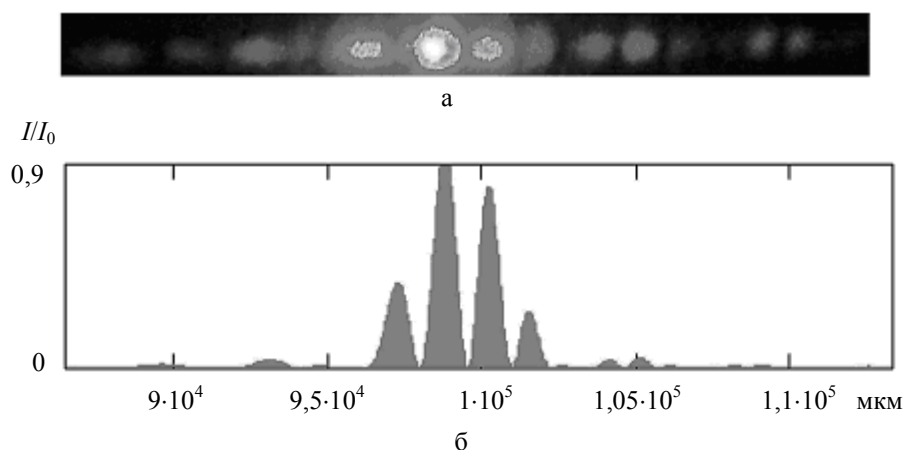


Рис. 4. Дифракционная картина, полученная в фокальной плоскости линзы при указанных параметрах установки (а), и соответствующий ей график распределения интенсивности света, полученный при помощи математической модели (б)

Заключение

Разработана математическая модель схемы дифракционного контроля положений объектов с изменяющимся масштабом их спектра Фурье. Представлены выражения, описывающие амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости линзы для каждого из объектов и итоговое распределение интенсивности света в плоскости регистрации для всей системы, учитывающие положения объектов в пространстве относительно линзы, а также угол падения излучения на систему. Работоспособность полученной математической модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

Представляет интерес дальнейшее изучение разработанной математической модели рассмотренной схемы дифракционного контроля, исследование зависимостей параметров дифракционной картины от смещения объектов и угла падения света на них, поиск областей наибольшей чувствительности к таким изменениям.

Литература

1. Назаров В.Н., Линьков А.Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптический журнал. – 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 // Оптический журнал. – 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 // Journal of Optical Technology. – 2009. – V. 76. – № 1. – P. 39–42.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970.
7. Тарлыков В.А. Лазерная дифрактометрия микрообъектов типовой формы. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2000.
8. Гудмен. Дж. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970.

Назаров Виктор Николаевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, naz_1946@mail.ru

Соколов Юрий Александрович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистрант, sokolov-juri@yandex.ru