

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУАРОВОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ

© 2010 г. В. Н. Назаров, канд. техн. наук; А. Н. Иванов, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: i_off@mail.ru

Предложен метод дифракционного контроля, основанный на освещении контролируемого объекта парой распространяющихся под углом друг к другу волновых фронтов. Установлено, что такое освещение приводит к формированию муаровой картины, вид которой связан с геометрическими параметрами контролируемого объекта. Рассмотрена возможность применения этого метода для контроля толщин объектов.

Ключевые слова: дифракционные измерения, муар, дифракционная картина.

Коды OCIS: 120.4630, 070.4560, 070.2580.

Поступила в редакцию 27.02.2009.

Введение

В настоящее время перспективными считаются дифракционные методы контроля (ДМК), основанные на освещении контролируемого объекта лазерным излучением и анализе получаемой дифракционной картины в дальней области. Их достоинствами являются относительная простота схем реализации, широкий диапазон измерений, возможность автоматизации измерительного процесса, невысокие требования к установке контролируемого объекта, возможность применения в цеховых условиях.

К сожалению, их точность на сегодняшний момент уже недостаточна, особенно по сравнению с интерференционными методами контроля, использующими компьютерные методы обработки измерительного сигнала. Поэтому актуальна задача – разработать гибридные схемы, комбинирующие достоинства дифракционных и интерференционных методов контроля.

Модель формирования муар-интерференционных полос при освещении объекта двумя наклонными волновыми фронтами

Проведенные исследования показали, что такая схема контроля может быть реализована при освещении контролируемого объекта двумя волновыми фронтами, распространяющимися

под углом 2θ друг к другу [1, 2]. Тогда изменение формы объекта, в соответствии с теоремой трансляции, приведет к появлению разности фаз между возникающими за объектом частотными спектрами

$$\Delta\Psi = 2k\Delta\theta, \quad (1)$$

где Δ – смещение оси симметрии объекта, вызванное изменением его формы; θ – угол падения волнового фронта на объект, k – волновое число.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что в случае, когда ось симметрии объекта разворачивается относительно первоначального положения, в дифракционной картине формируется дополнительная система полос, накладывающаяся на основную.

Было рассмотрено несколько способов реализации данной схемы. Наиболее простой из них оказалась схема, использующая “зеркальную” апертуру (ЗА), образованную плоской отражающей поверхностью и контролируемым краем объекта [1]. Деление волнового фронта на зеркале позволило получить требуемое условие освещения. Эксперимент показал, что, если край объекта не параллелен поверхности зеркала, в дифракционной картине наблюдается дополнительная система поперечных полос. Проведенные расчеты позволили получить выражение, связывающее распределение амплитуды сигнала в дальней области с геометрическими параметрами апертуры, –

$$U(\omega_x, y') = A \operatorname{sinc}[k\omega_x a(y)/2] \times \cos\{[(k\omega_x a(y) + k\Delta a(y)\theta]/2\}, \quad (2)$$

где $\omega_x = x'/z$ – пространственная частота, $A = a(y)/\sqrt{z\lambda}$, $a(y) = a_0 + \Delta a(y)$ – функция, связывающая изменение ширины зазора с изменением координаты y , направленной вдоль края объекта; $y = y'$ – координата в плоскости регистрации сигнала, соответствующая разным положениям края объекта. Моделирование по выражению (2) дало хорошее соответствие экспериментальным данным, а его анализ показал, что поперечные полосы удобно рассматривать как муаровые, которые возникают при наложении частотных спектров, описываемых множителями выражения (2). Параметрическое уравнение этих муаровых полос имеет вид

$$p = (2\Delta a(y)\theta - \lambda)/2\lambda, \quad (3)$$

где p – порядок муаровой полосы.

Возникновению одной муаровой полосы соответствует изменение фазы на 2π , поэтому по муаровой картине можно определить изменение разности фаз $\Delta\Psi(y)$ и из (1) определить положение края объекта. Для определения разности фаз можно использовать методы, применяемые в интерферометрии, что позволит уменьшить погрешность измерений до 0,1–0,5%.

Исследование влияния толщины края объекта на вид муар-интерференционной картины

Выражения, полученные ранее, были выведены при допущении, что край объекта является тонким. Так как края реальных объектов не являются тонкими, то важно рассмотреть, как их толщина будет влиять на дифракционную картину.

Рассмотрим особенности формирования дифракционной картины от зазора, возникающего между образующей неотражающей цилиндра и

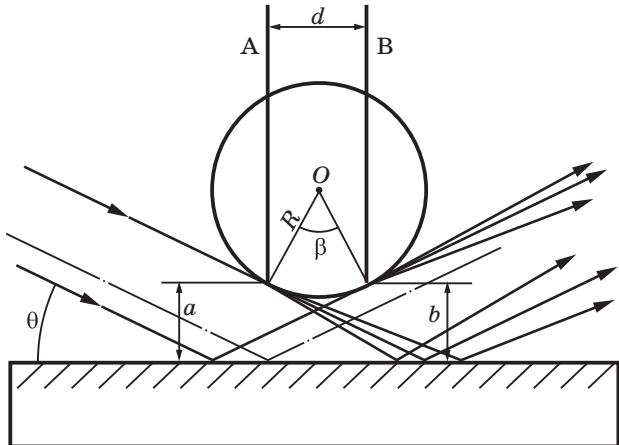


Рис. 1. Схема формирования дифракционной картины от зазора, образованного цилиндром и отражающей поверхностью. a и b – размеры зазоров, образованных эквивалентными краями и отражающей поверхностью; d – расстояние между краями.

плоской отражающей поверхностью (рис. 1). Исходя из метода эквивалентных диафрагм [3, 4], цилиндр можно заменить двумя тонкими краями А и В, разнесенными на расстояние $d = 2R\theta$. Согласно работе [5] наклонное падение световых волн на объект позволяет избежать вторичной дифракции, т. е. волновой фронт, дифрагированный на краю А, практически неискажается дифракцией на краю В, и наоборот. Схему, изображенную на рис. 1, можно развернуть в объект типа бипланарная щель [3, 5], ширина которой зависит от расстояния d и определяется выражением $W = a + b - d\theta = a + b'$, где a и b – зазоры между краями и зеркалом (рис. 2). Полное срезание отраженного волнового фронта и исчезновение муаровой картины произойдут, если $b = d\theta$.

С учетом вышесказанного, распределение амплитуды сигнала в дальней области примет вид

$$U(\omega_x, y) = (\exp(ikz)/ik\lambda) \left(C_1 \int_{-a(y)}^0 \exp(ik(\omega_x + \theta)) dx + C_2 \int_0^{b'(y)} \exp(ik(\omega_x - \theta)) dx \right), \quad (4)$$

$$C_1 = \exp(-ik\Delta a(y)(\omega_x + \theta)/2) \exp(-ikd(\omega_x + \theta)^2/2),$$

$$C_2 = \exp(-ik\Delta b(y)(\omega_x - \theta)/2),$$

где множители C_1 и C_2 описывают изменение фаз частотных спектров, вызванные смещениями

краев А и В относительно зеркала и относительно друг друга. Для упрощения (4) можно предположить, что $b' \approx a$, $\Delta a \approx \Delta b$. Первое допущение основано на анализе выражения (3), из которого следует, что постоянная составляющая ширины зазора не влияет на параметры муаровых полос.

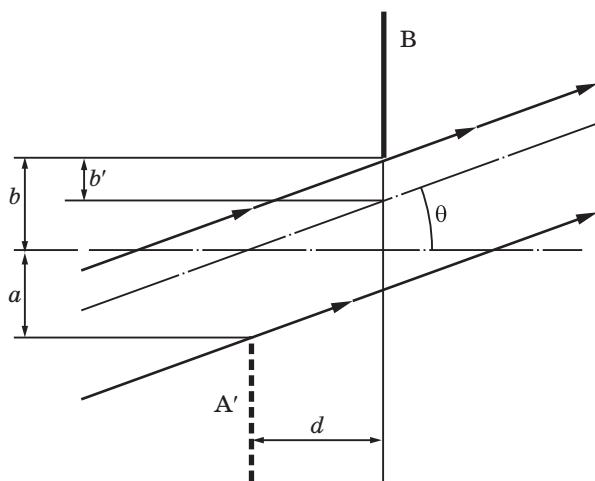


Рис. 2. Бипланарная щель, эквивалентная по действию на падающую волну схеме, изображенной на рис. 1. А' – изображение края А в зеркале.

Второе допущение можно принять при условии, что у образующей цилиндра нет отклонения от прямолинейности. Учитывая это и исключая из (4) частотный сдвиг θ , вызванный наклонным падением, и экспоненциальные множители, одинаковые для обеих частей (4), получим

$$U(\omega_x, y') \approx A \operatorname{sinc}[k\omega_x a(y)/2] \times \times \cos \{[k\omega_x a(y) + k\Delta a(y)\theta]/2 + k\omega_x^2 d/4\}. \quad (5)$$

Выражение (5) будет отличаться от (2) наличием дополнительного фазового множителя, описывающего продольное смещение края А относительно края В. Численное моделирование по (5) показало, что наличие толстого края приводит к наклону муар-интерференционных полос (рис. 3а), который увеличивается с ростом d .

Определим, как форма полос связана с толщиной края. Для этого выведем параметрическое уравнение муаровых полос из выражения (5)

$$p = (2\Delta a(y)\theta + \omega_x^2 d - \lambda)/2\lambda. \quad (6)$$

Предположим, что ось цилиндра расположена под углом α к поверхности зеркала. Тогда ширина зазора будет изменяться в соответствии с выражением $\Delta a = \Delta b = ay$ (координата y ориентирована вдоль зазора). Уравнение муаровой полосы будет иметь вид

$$y' = (x'^2 d / 2\alpha \theta z^2) - (\lambda(2p-1) / 2\alpha \theta), \quad (7)$$

а наклон касательной к полосе может быть найден из выражения

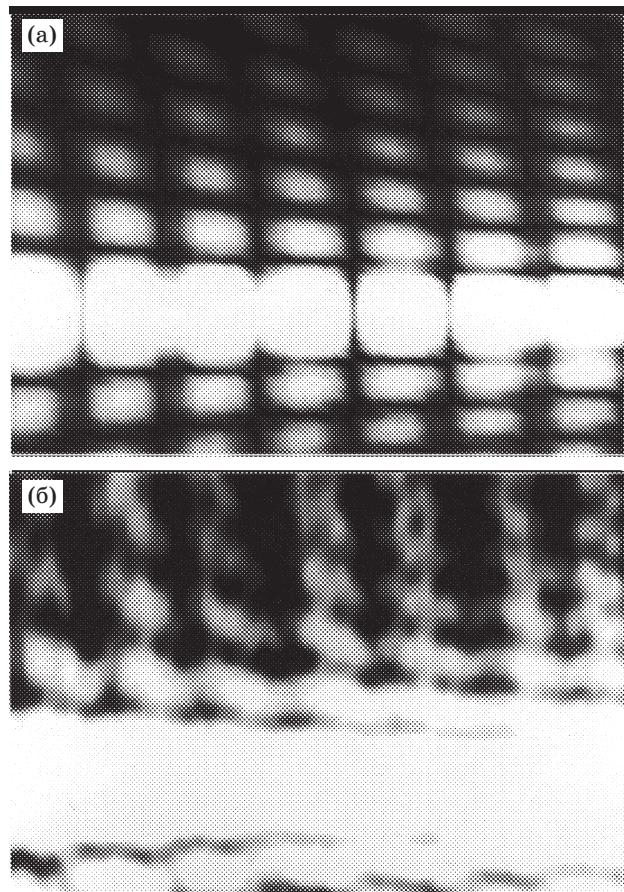


Рис. 3. Муаровые полосы, возникающие при дифракции на зазоре, образованном металлическим цилиндром диаметром 10 мм и плоским зеркалом; ширина зазора – 100 мкм, угол падения волн на зеркало – 87°, угол наклона цилиндра – 10°. а – результат численного моделирования, б – результат эксперимента.

$$\gamma = dy'/dx' = x'd/z^2\theta\alpha. \quad (8)$$

Анализ выражения (8) показал, что при значениях $z > 300$ мм можно считать тонкими края, у которых радиус закругления не больше 100 мкм. В таком случае наклон касательных к полосам не превышает нескольких угловых минут.

Ширина муаровой полосы не зависит от толщины края. Это можно доказать, если выразить y' как функцию от параметра p . Тогда ширину полосы можно найти из выражения

$$S = y(p+1) - y(p) = \lambda/\alpha\theta. \quad (9)$$

В выражении (9) ширина полосы S не зависит от d и соответствует ширине полосы от тонкого края.

Экспериментальное исследование

Для экспериментального исследования муаровой картины был собран макет измерительной установки, схема которого изображена на рис. 4.

В первой части работы проверялось соответствие экспериментально полученных муаровых полос результатам численного моделирования по выражению (5). Было установлено, что наличие толстого края объекта приводит к наклону возникающих муаровых полос, который увеличивается с увеличением диаметра цилиндра. Как и было предсказано на стадии теоретических расчетов, когда диаметр цилиндра достигал определенного значения, происходило срезание одного из накладывающихся частотных спектров и муаровая картина полностью исчезала. Пример экспериментально полученной муаровой картины приведен на рис. 3б.

На второй стадии эксперимента проводилась оценка диаметра калиброванного цилиндра (диаметр 13 мм) по муаровой картине. Для этого с помощью низкочастотного фильтра из нее предварительно удалялись фоновые дифракционные полосы [1]. Затем на муаровой полосе порядка p выбирались три точки минимума, так чтобы $x_3' - x_2' = x_2' - x_1' = \Delta x'$ (рис. 5). Эти координаты подставлялись в выражение (7), что позволило получить две системы уравнений:

$$\begin{cases} y_3' = f(x_3') \\ y_2' = f(x_2') \end{cases} \text{ и } \begin{cases} y_2' = f(x_2') \\ y_1' = f(x_1') \end{cases}.$$

Их совместное решение позволило определить расстояние между эквивалентными плоскостями как

$$d = \Delta y' \alpha \theta z^2 / \Delta x'^2,$$

где $\Delta y' = (y_3' - y_2') - (y_2' - y_1')$. Диаметр цилиндра определялся из выражения $D = d/\theta$. Погрешность измерения составила порядка 3%, что превысило расчетное значение погрешности в два раза. Это может быть объяснено значительной погрешностью определения координат минимумов полосы, так как чувствительность приемника к изменению сигнала dI/dx в их окрестности близка к нулю.

Заключение

Рассмотрен новый метод дифракционного контроля, основанный на использовании фазовой составляющей сигнала измерительной информации. Получено хорошее соответствие

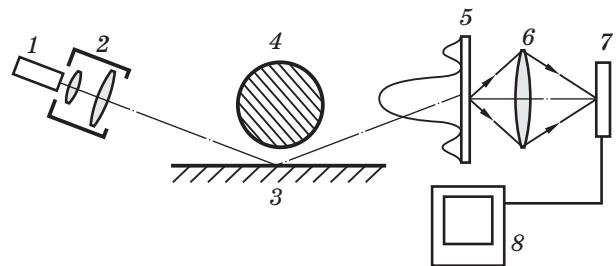


Рис. 4. Схема макета экспериментальной установки. 1 – лазер, 2 – расширитель лазерного пучка, 3 – плоское зеркало, 4 – контролируемый цилиндр, 5 – матовый экран, 6 – объектив, 7 – ПЗС, 8 – блок регистрации.

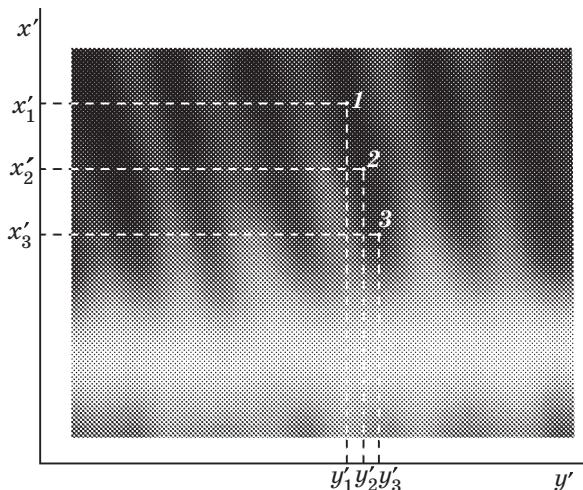


Рис. 5. Муаровая картина после ее обработки низкочастотным фильтром. x' и y' – координаты минимума полосы порядка p .

между результатами численного моделирования и экспериментом. Проведено исследование влияния толщины краев объекта на вид муаровых полос, и выведено выражение, связывающее толщину края с параметрами муаровых полос. Показано, что данный метод может быть использован для контроля металлических цилиндров большого диаметра, бесконтактный контроль которых представляет известную трудность. Важной особенностью предложенного метода является возможность независимо друг от друга контролировать диаметр цилиндра и отклонение от прямолинейности его образующей. В перспективе он может быть использован для контроля валов различной конфигурации, цилиндрических калибров и других объектов подобной формы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга (грант 28-04/18).

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров В.Н., Иванов А.Н. Использование явления муара для увеличения точности дифракционных методов контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 1. С. 46–50.
 2. Иванов А.Н., Назаров В.Н. Дифракционный метод контроля на основе “зеркальной” апертуры //
 - Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50. № 4. С. 38–42.
 3. Чугуй Ю.В. Определение геометрических параметров протяженных объектов постоянной толщины по их дифракционным картинам // Автометрия. 1991. № 6. С. 76–92.
 4. Лемешко Ю.А., Чугуй Ю.В. Размерный контроль круговых отражающих цилиндров интерференционным методом // Автометрия. 2003. Т. 39. № 5. С. 42–52.
 5. Зебрева К.А., Чугуй Ю.В. Расчет дифракционных явлений на 3D объектах постоянной толщины при различных конфигурациях освещения // Труды VII Международной конференции “Прикладная оптика 2006”. СПб. 2006. Т. 3. С. 258–267.
-