

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ МУАРА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ДИФРАКЦИОННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

© 2009 г. В. Н. Назаров, канд. техн. наук; А. Н. Иванов

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

E-mail: i_off@mail.ru

Рассмотрен дифракционный метод контроля, позволяющий использовать фазовую составляющую измерительного сигнала, несущую данные о геометрической форме и пространственном положении объекта. Для повышения чувствительности и точности измерений была реализована оптическая система обработки информации, в которой контролируемый объект освещается двумя смещенными в пространстве пучками когерентного излучения. Это позволило ввести фазовый сдвиг между их частотными спектрами при изменении параметров объекта и получить в плоскости регистрации муар-интерференционные полосы, анализируя которые можно получить данные о контролируемом объекте. Дан пример использования метода для исследования формы профиля края объекта.

Коды OCIS: 120.4630, 070.4560, 070.2580.

Поступила в редакцию 02.06.2008.

Введение

Дифракционные методы контроля (ДМК) геометрических параметров и пространственного положения объектов достаточно часто используются в измерительной технике, когда требуется высокая точность, бесконтактность, малое время и локальность измерений, а также возможность автоматизации процесса измерения. Препятствием для дальнейшего увеличения точности ДМК является их недостаточная точность из-за регистрации дифракционной картины квадратичными приемниками. Поэтому дальнейшие исследования в целях повышения точности и чувствительности ДМК требуют создания оптической системы обработки информации (ОСОИ), использующей амплитудно-фазовое распределение световых полей за контролируемым объектом.

Распределение амплитуды поля в дифракционной картине является частотным спектром функции пропускания контролируемого объекта. Этот частотный спектр можно считать амплитудно-фазовой решеткой, вид которой зависит от геометрической формы и пространственного положения контролируемого объекта. Освещение контролируемого объекта двумя плоскими волновыми фронтами, падающими под углами θ и $-\theta$, позволяет получить два смещенных в пространстве частотных спектра объекта и ввести разность фаз между ними при смещении оси симметрии контролируемого объекта [1]

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

где k – волновое число, Δx – смещение оси симметрии объекта.

Способы получения муар-интерференционных полос

Для реализации предложенного метода была использована “зеркальная” апертура (рис. 1), которая образована контролируемым краем объекта и плоской отражающей поверхностью.

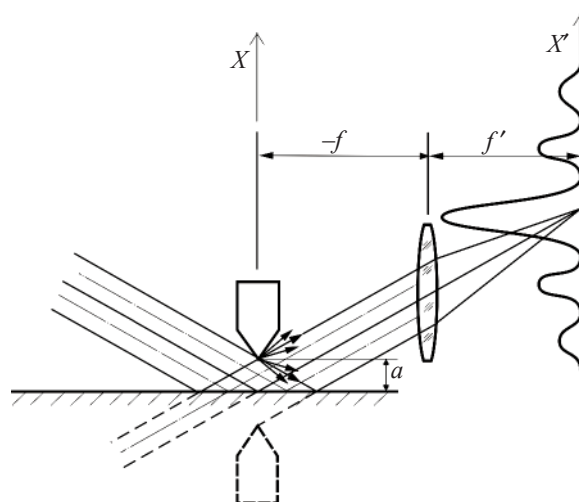


Рис. 1. “Зеркальная” апертура, образованная краем объекта и плоской отражающей поверхностью. a – ширина апертуры, f – фокусное расстояние объектива.

кой эталонной отражающей поверхностью [2–4]. Экспериментальное исследование дифракционной картины от такой апертуры, приведенное в работах [2, 3], показало, что непараллельность края объекта и поверхности зеркала приводит к появлению в дифракционной картине дополнительной системы муаровых полос, перпендикулярных к оси симметрии дифракционной картины (рис. 2а). Объяснить их возникновение можно следующим образом: на одном и том же краю объекта испытывают дифракцию две волны, возникшие при делении исходного волнового фронта на зеркале. Это приводит к появлению в плоскости регистрации двух дифракционных картин этого края. Когда край расположен под углом к зеркалу, эти дифракционные картины тоже будут ориентированы под углом друг к другу. В результате в области их перекрытия возникнут муар-интерференционные полосы.

Проведенные расчеты позволили получить аналитическое выражение, описывающее распределение амплитуды в дальней области от такой апертуры

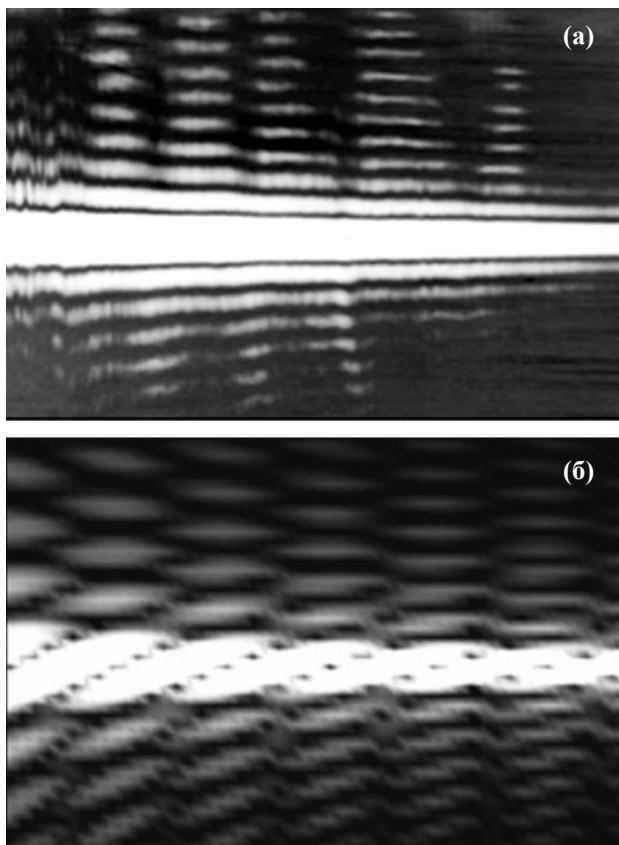


Рис. 2. Муар-интерференционные полосы, возникающие при наклоне кромки объекта на угол, равный 14° , угол падения света на зеркало 87° . а – результат эксперимента, б – результат численного моделирования.

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

где $\omega_x = kx'/f$ – пространственная частота, $a(y) = a_0 + \Delta a(y)$ – функция, описывающая изменение ширины зазора между зеркалом и краем объекта, $A = a(y)/\sqrt{f\lambda}$, $y = y'$.

Из выражения (2) видно, что частотные спектры, описываемые sinc-функцией и функцией \cos , сдвинуты по фазе относительно друг друга на $\Delta\Psi(y) = k\Delta a(y)\theta$. Когда $\Delta\Psi$ кратно 2π , дифракционная картина от “зеркальной” апертуры соответствует дифракционной картине от обычной щелевой апертуры шириной $2a$. Если $\Delta\Psi$ кратно π , то минимумы и максимумы в дифракционной картине меняются местами, в результате возникает поперечная полоса.

Причиной возникновения фазового сдвига является смещение центра “зеркальной” апертуры при изменении ее ширины, как проиллюстрировано на рис. 3. Деление падающего волнового фронта на зеркале приводит к тому, что через апертуру проходят два волновых фронта W_1 и W_2 , расположенные под углом друг к другу. Когда край объекта находится в начальном положении a_1 , разность хода между этими волновыми фронтами в центре “зеркальной” апертуры равна нулю. Если край объекта

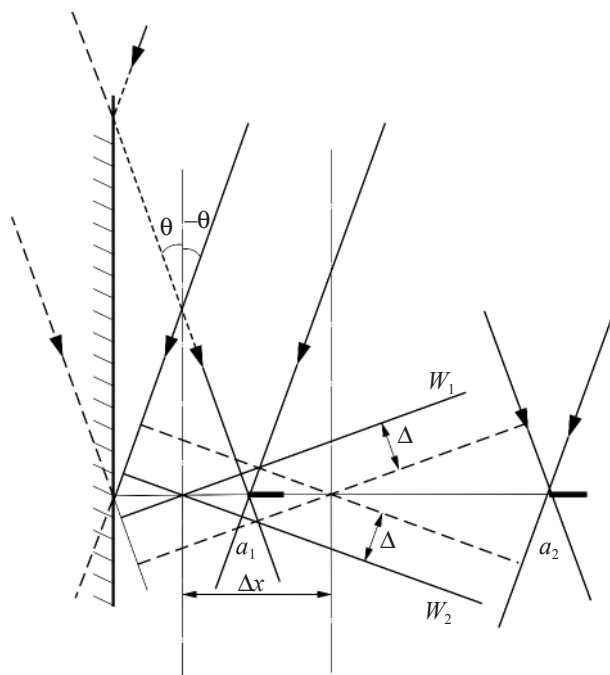


Рис. 3. Возникновение разности хода между проходящими через “зеркальную” апертуру волновыми фронтами. a_1 и a_2 – положения края объекта, θ – угол падения волнового фронта на апертуру, W_1 и W_2 – падающие волновые фронты, Δx – смещение центра апертуры, Δ – разность хода, вводимая смещением края объекта.

сместиться в положение a_2 , то разность хода между этими волновыми фронтами в новом центре “зеркальной” апертуры уже не будет равна нулю, так как волновой фронт W_1 получит отставание на $\Delta = \Delta x \theta$, а волновой фронт W_2 опережение на аналогичное значение. Отсюда можно сделать вывод, что изменение ширины щели на $\Delta a = a_2 - a_1$ приведет к смещению ее центра $\Delta x = \Delta a / 2$ и возникновению фазового сдвига между прошедшими через апертуру волновыми фронтами

$$\Delta\Psi = k\Delta a\theta. \quad (3)$$

Так как появлению одной муаровой полосы соответствует изменение разности фаз на 2π , это позволяет получить из муаровой картины функцию, описывающую изменение разности фаз частотных спектров вдоль края объекта. Тогда можно определить форму контура края объекта из формулы

$$\Delta a(y) = \Delta\Psi(y) / k\theta. \quad (4)$$

Исследование метрологических характеристик предложенного метода показало, что его точность главным образом определяется погрешностью восстановления разности фаз $\delta\Psi(y)$, которая в свою очередь зависит от выбора метода расшифровки муаровой картины.

Недостатком муаровой картины является ее низкий контраст. Это связано с тем, что амплитуда sinc -функции быстро падает, что ведет к падению контраста. Поэтому требуется получить такую оптическую схему, которая позволяет добиться более высокого контраста муаровых полос в области их локализации.

Для этого было предложено модернизировать “зеркальную” апертуру – расположить край контролируемого объекта так, чтобы он лежал в одной плоскости с краем зеркала. В этом случае в плоскости регистрации будет наблюдаться два частотных спектра, разнесенных на расстояние $l = 2z\theta$. Распределение амплитуды в дальней области при освещении плоской волной единичной амплитуды будет

$$U(\omega_x, y') = C [B \text{sinc}(a(y)(\omega_x + k\theta)/2) - B^* \text{sinc}(a(y)(\omega_x - k\theta)/2)], \quad (5)$$

$$B = \exp(-ik\Delta a(y)\theta/2),$$

$$C = \exp(-ikz) \exp(-ik\Delta a(y)\omega_x) / \sqrt{i\lambda z}.$$

Если край объекта непараллелен краю зеркала, то в такой дифракционной картине тоже возникают муар-интерференционные полосы (рис. 4а). Физически объяснить причину их возникновения можно следующим образом: если для определенной ши-

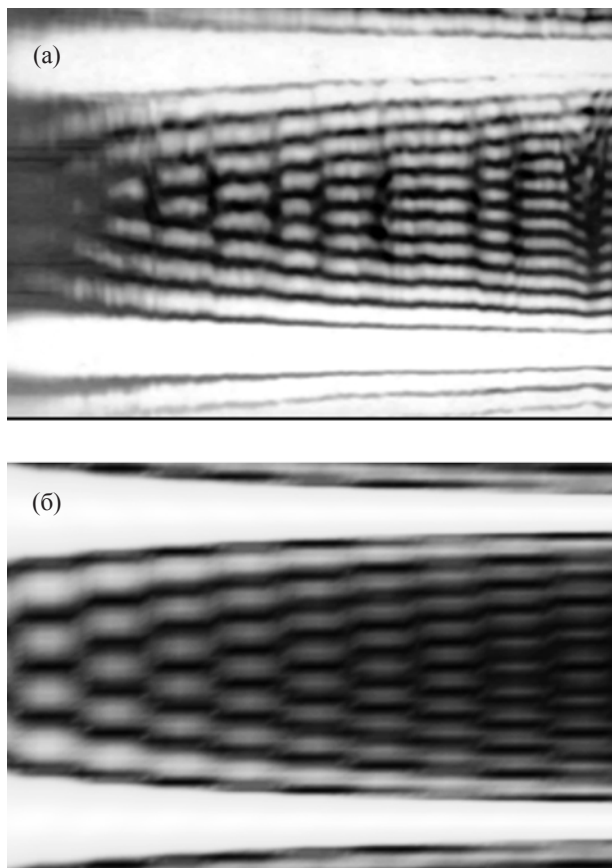


Рис. 4. Муар-интерференционные полосы, возникающие при наклоне кромки объекта на угол, равный $11'$, угол падения света на зеркало 87° . а – результат эксперимента, б – результат численного моделирования.

рины апертуры максимумы и минимумы смещенных частотных спектров совпадают, то происходит их взаимное гашение и наблюдается темная полоса. Наоборот, при совпадении максимумов одного частотного спектра с минимумами другого происходит сложение амплитуд. Такая муаровая картина соответствует муаровой картине вычитания. Ее преимуществом является более высокая контрастность, так как наложение частотных спектров происходит в той области, где их амплитуды не так сильно отличаются друг от друга.

Анализ муар-интерференционных картин

Подробный анализ муаровой картины с умножением частотных спектров был приведен в работе [5]. В этом случае, чтобы получить уравнение муаровых полос, была использована стандартная методика [6]. Сначала были получены параметрические уравнения для каждого из множителей выражения (2), разность которых и дает параметрическое уравнение муаровых полос

$$p = (k\Delta a(y)\theta - \pi)/2\pi. \quad (6)$$

Несколько сложнее дело обстоит в случае муара, полученного вычитанием частотных спектров. Проанализируем выражение (5). Так как представляет интерес только положение центров муаровых полос, заменим в (5) функцию $\text{sinc}(x)$ функцией $\sin(x)$ – координаты максимумов и минимумов у них совпадают. Это позволяет привести выражение (5) к виду

$$U(\omega_x, y') = C \sin(k\Delta a(y)\theta) \exp(ika(y)\omega_x). \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что дифракционная картина содержит поперечные муаровые полосы, параметрическое уравнение которых можно получить, приравняв (7) к нулю

$$p = (k\Delta a(y)\theta)/\pi. \quad (8)$$

Параметрические уравнения (6) и (8) позволяют связать вид муаровой картины с геометрической формой контролируемого края объекта. Их анализ показывает, что чувствительность муара, полученного вычитанием частотных спектров, в два раза выше, чем у муара, полученного умножением частотных спектров. В первом случае одна муаровая полоса возникает при изменении ширины апертуры $\Delta a = \lambda/\theta$, а во втором случае – $\Delta a = \lambda/2\theta$.

Экспериментальное исследование

Проверка соответствия экспериментальных результатов исследования работы ОСОИ с результатами численного моделирования включала сравнение экспериментально полученных муар-интерференционных картин с результатами численного моделирования по формулам (3) и (5) и проверку теоретического положения, согласно которому изменение муар-интерференционной картины связано с изменением формы “зеркальной” апертуры выражением (2).

Сравнение теоретического (рис. 2б и 4б) и экспериментального распределений интенсивности (рис. 2а и 4а) позволило сделать вывод о правильности сделанных теоретических допущений при разработке математической модели. Изменение ширины муаровых полос в экспериментально полученных изображениях вызвано отклонением от прямолинейности края объекта, с помощью которого была образована “зеркальная” апертура. Отличие рис. 2а и 2б в области главного максимума вызвано тем, что модель не учитывала влияние излучения, прямо прошедшего через апертуру.

Для того, чтобы извлечь из муар-интерференционных полос разность фазы, потребовалось уstra-

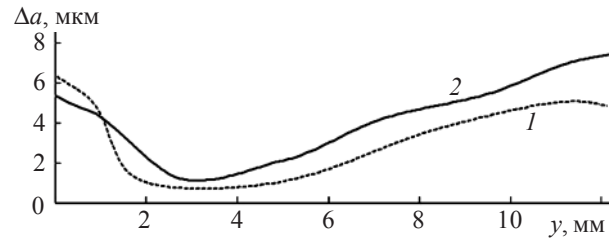


Рис. 5. Сравнение профилей кромки опасной бритвы, полученных с помощью микроскопа УИМ-23 – 1 и “зеркальной” апертуры – 2.

нить из нее фоновые дифракционные полосы, которые являются низкочастотным шумом. Эта операция была выполнена посредством свертки исходного изображения $f(x)$ с одномерной функцией Гаусса

$$h(x) \otimes f(x) = F^{-1} |H(p)F(p)|, \quad (9)$$

где $h(x) = A \exp[-x^2/(2\sigma_x^2)]$ – функция Гаусса, которая действует как низкочастотный фильтр. Для полного устранения фона необходимо, чтобы выполнялось условие $\sigma_x \geq 3/\nu$, где ν – частота фона.

Восстановление разности фаз осуществлялось методом разделения спектральных составляющих в частотной области [6–8]. Знание функции $\Delta\psi(y)$ позволило определить из нее по выражению (4) закон изменения формы кромки объекта $\Delta a(y)$.

В ходе эксперимента кромка объекта наклонялась на угол α относительно отражающей поверхности, что приводило к появлению муар-интерференционных полос. Из полученной картины определялось угловое положение кромки объекта относительно отражающей поверхности – угол α_e . Сравнение введенных и полученных углов показало, что выражения (2) и (5) правильно описывают поведение муаровой картины, хотя погрешность измерений оказалась значительно выше расчетной. Это может быть объяснено высоким уровнем шума в экспериментальной установке, к которому очень чувствителен метод разделения частотных составляющих в спектральной области, и отклонением формы края объекта от прямолинейной.

На рис. 5 приведен пример восстановления по муаровой картине формы режущей кромки опасной бритвы. Правильность полученных результатов подтверждается результатами определения формы этой кромки с помощью измерительного микроскопа УИМ-23.

Заключение

В работе предложен метод дифракционного контроля, использующий “зеркальную” апертуру для уменьшения погрешности измерений. Это достига-

ется регистрацией не дифракционных полос, а дополнительной к дифракционным полосам системы муар-интерференционных полос, что позволяет использовать при их расшифровке хорошо отработанные точные методы, применяемые в интерферометрии. Проведенные расчеты показали, что восстановление по муар-интерференционной картине поля разности фаз, несущей информацию о параметрах объекта, дает возможность значительно уменьшить погрешность измерений с 2–3% до 0,5–0,2%.

Рассмотренный метод может быть применен для контроля формы краев объектов типа лекальных линеек и угольников, ножей теневых приборов, различных диафрагм. Другой возможной областью применения может быть анализ вибраций, биений и деформаций объектов, измерение размеров протяженных объектов типа волокон, нитей и проволок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптическая голография. Т. 2 / Под ред. Колфилда Г. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 648 с.
2. Pryor T.R., Hageniers O.L., North W.P.T. Diffractographic dimensional measurement. Part 1: Displacement measurement // *Appl. Opt.* 1972. V. 11. № 2. P. 308–313
3. Иванов А.Н., Назаров В.Н. Дифракционный метод контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов с помощью “зеркальной” апертуры // Труды VII Международной конф. “Прикладная оптика-2006”. СПб. 2006, Т. 1. С. 97–101.
4. Иванов А.Н., Назаров В.Н. Дифракционный метод контроля на основе “зеркальной” апертуры // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2007. Т. 50. № 4. С. 38–42.
5. Назаров В.Н., Линьков А.Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // *Оптический журнал.* 2002. Т. 69. № 2. С. 76–81.
6. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // *JOSA.* 1982. V. 72. № 1. P. 156–160.
7. Massig J., Heppner J. Fringe pattern analysis with high accuracy by use of the Fourier-transform method: theory and experimental tests // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. № 13. P. 2081–2088.
8. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия. Новосибирск: изд-во НГТУ, 2004. 252 с.