

УДК 531.7/004.932

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН ФРАУНГОФЕРА
ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ

А.Н. Иванов, В.М. Михайлов

Разработан новый метод цифровой обработки дифракционных картин, который позволит увеличить точность методов дифракционного контроля. Предложено регистрировать координаты точек перегиба главного максимума дифракционной картины, обладающих высокой чувствительностью к изменению размера контролируемого объекта.

Ключевые слова: дифракция Фраунгофера, обработка изображения.

Введение

Определение размера объекта по дифракционной картине Фраунгофера заключается в том, что по функции пространственного распределения интенсивности $I(x)$ определяются координаты ее характерных точек – минимумов, максимумов, точек перегиба. Затем определяется коэффициент, связывающий эти координаты с размером объекта. Обычно в качестве характерных точек используют минимумы дифракционной картины, но такой метод сильно ограничен тем, что точно определить координаты этих точек очень трудно – чувствительность сигнала $dI(x)/dx$ в их окрестности близка к нулю [1]. Именно эта ошибка в определении координат является доминирующей в методах дифракционного контроля и сильно ограничивает их точность. Особенно сильно она сказывается при малых (менее 50 мкм) размерах объекта, когда происходят падение освещенности в дифракционной картине и «размазывание» ее минимумов.

Устранить указанный недостаток можно двумя способами. Первый из них основан на регистрации точек инверсии фазы частотного спектра объекта, координаты которых совпадают с координатами минимумов дифракционной картины. В работе [1] для этого предлагается метод измерения, основанный на последовательном преобразовании Фурье функции амплитудного пропускания объекта и преобразовании Френеля его частотного спектра. Это позволяет уменьшить погрешность измерения на порядок (с 1% до 0,1%). Недостатком данного метода является сложность схем его практической реализации.

Другой способ основан на регистрации характерных точек изображения дифракционной картины после ее преобразования по какому-либо закону [2, 3]. Особый интерес представляет работа [3], в которой предлагается преобразовать главный максимум исходной дифракционной картины в соответствии с выражением $I(x)_n = 2I(x)_{n-1}^2 - 1$, где $I(x)$ – распределение интенсивности в дифракционной картине, n – количество преобразований дифракционной картины, x – линейная координата в плоскости регистрации. Определив координаты нулей функции $I(x)_n$, можно вычислить размер контролируемого объекта. Эти нули определяются с высокой точностью, кроме того, использование только центрального максимума позволяет расширить диапазон контролируемых размеров. К сожалению, практическое применение данного метода затруднено тем, что он весьма чувствителен к шуму. Наличие мультипликативного шума приводит к сильному смещению нулей преобразованной функции (ошибка измерения составила 20% при наличии фона в 3% от величины сигнала).

Анализ главного максимума дифракционной картины от объекта в форме щели

Для решения указанной проблемы предлагается использовать другие характерные точки дифракционной картины – точки перегиба. Исследование дифракционной картины от щели, которая описывается функцией $I(U) = \sin(U)^2 / U^2$, где $U = ka x / 2f$, a – ширина щели, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, f – фокусное расстояние объектива, показало, что ее главный максимум имеет две такие точки. Чтобы определить их положение, необходимо взять вторую производную от исходной функции $I(U)$:

$$I''(U) = d^2 I(U) / dU^2. \quad (1)$$

Приравняв выражение (1) к нулю, найдем значения U , соответствующие положениям точек перегиба в области главного максимума: $U_2 = 1,303$ и $U_1 = -1,303$ (рис. 1). Чувствительность функции $I(U)$ к изменению аргумента U в этих точках имеет максимальное значение $dI(U)/dU \approx 0,54$.

Если зарегистрировать главный максимум дифракционной картины и определить через его вторую производную $d^2 I(x)/dx^2$ разность линейных координат точек перегиба $\Delta x = x_2 - x_1$, то она будет связана с разностью $\Delta U = U_2 - U_1 = 2,606$ простой зависимостью $\Delta U = ka \Delta x / 2f$, воспользовавшись которой, можно определить размер объекта a :

$$a = 2 \Delta U f / k \Delta x = 5,212 f / k \Delta x. \quad (2)$$

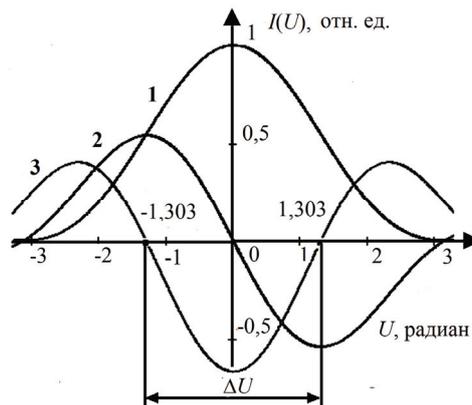


Рис.1. Результат дифференцирования численной модели главного максимума дифракционной картины: 1 – исходное распределение интенсивности, 2 – первая производная, 3 – вторая производная

Экспериментальное исследование

Для проверки предложенного алгоритма была собрана экспериментальная установка (рис. 2), состоящая из лазера ЛГ-105, спектральной щели с шагом раскрытия 1 мкм, объектива, выполняющего преобразование Фурье, с фокусным расстоянием $f = 25$ мм и ПЗС-камеры, имеющей диагональ $\frac{1}{2}$ " и разрешение 792×576 пикселей.

В ходе эксперимента регистрировались дифракционные картины от щели, ширина которой изменялась в диапазоне от 30 до 55 мкм с шагом 5 мкм. Зарегистрированные максимумы дифракционных картин подвергались предварительной обработке с целью подавления мультипликативного и высокочастотного аддитивного шумов в соответствии с методами, описанными в работе [4].

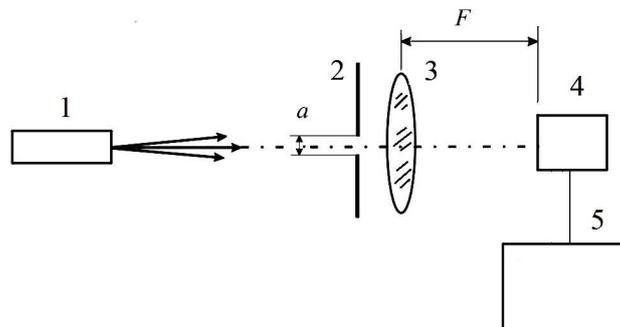


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения ширины щели дифракционным методом: 1 – лазер, 2 – щелевая диафрагма, 3 – Фурье-объектив, 4 – ПЗС-камера, 5 – компьютер с платой видеозахвата

Затем изображения численно дифференцировались два раза, что позволяло надежно определить координаты их точек перегиба x . Для численного дифференцирования использовалась интерполяционная формула Ньютона [5]

$$I'_i \approx \left((I_{i+1} - I_i) - (I_{i+1} - I_i)^2 / 2 + (I_{i+1} - I_i)^3 / 3 \right) / h,$$

где i – номер элемента ПЗС-приемника, I_i – интенсивность сигнала в i -м элементе, h – шаг изменения значений ($h = 1$ пиксель). Результаты численного дифференцирования дифракционной картины приведены на рис. 3, а результаты измерений ширины щели – в таблице. Чтобы показать преимущества предложенного метода, ширина щели была также определена через разность координат минимумов дифракционной картины.

Относительная погрешность измерения предложенным методом оказалась в пределах 0,5–5%. С уменьшением размера объекта погрешность увеличивалась, что обусловлено уменьшением высоты главного максимума и, как следствие, уменьшением отношения сигнал–шум. Искажение формы сигнала приводило к трудности при определении координат точек перегиба. Также источниками погрешности служили ошибка установки щели на нуль, ошибка установки отсчета шкалы щели, разворот дифракционной картины в плоскости приемника.

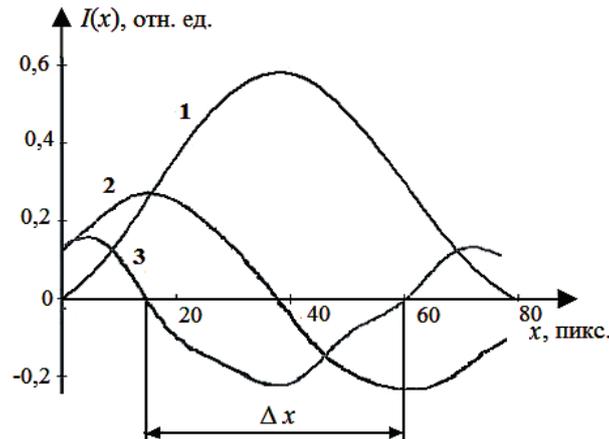


Рис. 3. Результат дифференцирования дифракционной картины от щели шириной 50 мкм: 1 – распределение интенсивности в главном максимуме; 2 – первая производная; 3 – вторая производная

Задаваемое значение ширины щели, мкм	Ширина щели, определенная из разности координат точек перегиба, мкм	Ширина щели, определенная из разности координат минимумов, мкм
55	55,7	57,8
50	51,4	53,7
45	46,1	46,7
40	41,8	36,6
35	38,7	28,2
30	35,2	20,5

Таблица. Результаты измерения ширины щели

Заключение

Предложен метод цифровой обработки дифракционных картин. Его преимуществом по сравнению с существующими методами является использование точек перегиба главного максимума дифракционной картины, обладающих высокой чувствительностью к изменению размера объекта. Несложные преобразования исходного измерительного сигнала позволяют надежно и с хорошей точностью определить их координаты. Кроме того, центральный максимум менее подвержен влиянию высокочастотного шума, возникающего при рассеянии излучения на микродефектах оптических элементов измерительной схемы. Данный метод удобен для контроля объектов малого размера, когда на площадку ПЗС-приемника укладывается только главный максимум дифракционной картины.

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. Фефилов Г.Д. Оценка погрешности определения моментов экстремума в дифракционной картине Эйри при воздействии аддитивной помехи // Научно-технический вестник СПбГУИТМО. – 2006. – № 31. – С. 55–58.
3. Власов Н.Г., Кулиш С.М. Нелинейная цифровая обработка дифракционных картин // Мир техники кино. – 2008. – № 8. – С. 41–42.
4. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Земцев А.Ю., Степанов С.А. Разработка методов и программных средств подавления шумов в интерферограммах на этапе их предварительной обработки // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 28. – С. 140–144.
5. Исаков В.Н. Элементы численных методов. – М.: АСАДЕМА, 2003. – 192 с.

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

Михайлов Виталий Михайлович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, mynameisvitalik@gmail.ru