

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЛОКАЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТОВОГО СИГНАЛА ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ ПОВЕРХНОСТИ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

О. В. КОФНОВ¹, Е. Л. ЛЕБЕДЕВ², А. В. МИХАЙЛЕНКО²

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
191186, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kofnov@mail.ru

²Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия

Представлен метод автоматического поиска локальных максимумов распределения интенсивности светового сигнала в изображении дифракционной картины. Предлагается „рассекать“ исходный график распределения интенсивности аппроксимирующей функцией для средних значений, после чего искомые дифракционные максимумы будут лежать выше аппроксимирующей функции, что позволяет находить их координаты любым алгоритмом поиска максимума для непрерывного участка. Найденные координаты максимумов позволяют определять геометрические параметры структуры материалов по методу двойного Фурье-преобразования. Таким образом, метод может быть применен для решения задач автоматического контроля качества.

Ключевые слова: локальные максимумы, структура, преобразование Фурье, дифракционная картина, контроль качества

Введение. Существенное влияние на состояние элементов изделий оказывают параметры технологического процесса производства, в рамках которого возможно применение различных методов неразрушающего контроля качества (рентгеновского, ультразвукового, вихретокового, акустического, оптического и т.д.) [1] для анализа геометрических параметров. Метрологические требования к методам контроля качества приведены в работе [2].

Наиболее перспективны оптические методы определения геометрических параметров периодических структур материалов [3] с использованием дифракционных картин (как полученных при освещении образца пучком монохромного света, так и рассчитанных с использованием интеграла Френеля—Кирхгофа), обладающие такими преимуществами, как высокая скорость измерений, бесконтактность, высокая точность. Аналогичные методы могут быть применены и для определения параметров поверхностей с периодической структурой различных промышленных изделий [4]. Средние значения этих геометрических параметров позволяют оценить физические и технологические характеристики исследуемых образцов и контролировать их качество.

Для измерения линейных геометрических расстояний между периодическими элементами структуры текстильных материалов предложено использовать „двойное Фурье-преобразование“ [5—7], заключающееся в получении вторичной дифракционной картины структуры материала и определении расстояний между соседними нитями по расстояниям между дифракционными максимумами (максимумами интенсивности) в расчетной дифракционной картине.

Описание предлагаемого метода. Выполняется цифровая фотография образца (рис. 1, а) с поверхностной периодической структурой. На эту фотографию накладывается световое пятно (рис. 1, б) с интенсивностью, распределенной по экспоненциальному закону, что соответствует освещению образца лучом лазера. Затем по полученному цифровому изображению

с использованием интеграла Френеля—Кирхгофа строится модель изображения дифракционной картины. Для вычисления интеграла Френеля—Кирхгофа используется алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье [8]. По полученному двумерному полю распределения интенсивностей светового сигнала интеграл Френеля—Кирхгофа рассчитывается второй раз с использованием быстрого преобразования Фурье. Если в первой дифракционной картине расстояния между дифракционными максимумами обратно пропорциональны расстояниям между элементами периодической структуры поверхности образца, то во второй дифракционной картине они им прямо пропорциональны (равны с точностью до коэффициента увеличения при фотосъемке).

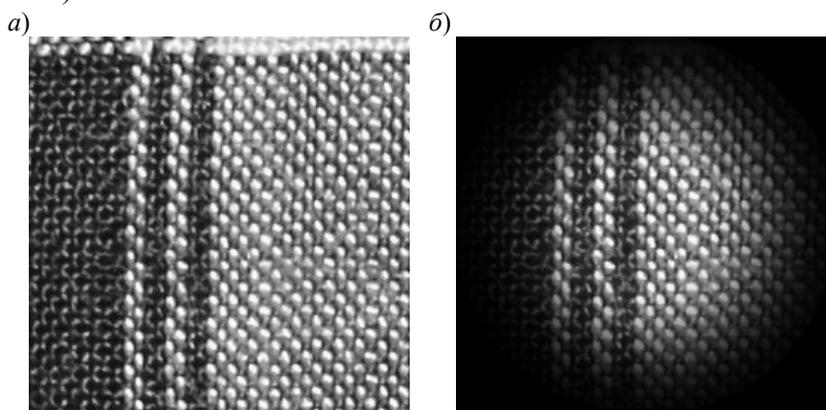


Рис. 1

Аналогичный аппаратный способ, описанный в работе [9], заключается в получении изображения дифракционной картины материала на фотопластинке и дальнейшем освещении этой фотопластинки лучом монохромного света с целью получения дифракционной картины. Преимуществом как аппаратного, так и расчетного способов определения геометрических параметров исходного материала является простота определения линейных размеров (прямое измерение расстояния между соседними максимумами интенсивности с последующим умножением на коэффициент увеличения микроскопа и фотоаппарата).

На рис. 2 представлены дифракционная картина переплетения „тарган“ после двойного фурье-преобразования распределения интенсивности светового сигнала в срезах поля вдоль горизонтальной и вертикальной центральных осей изображения (скриншот программы [10]).

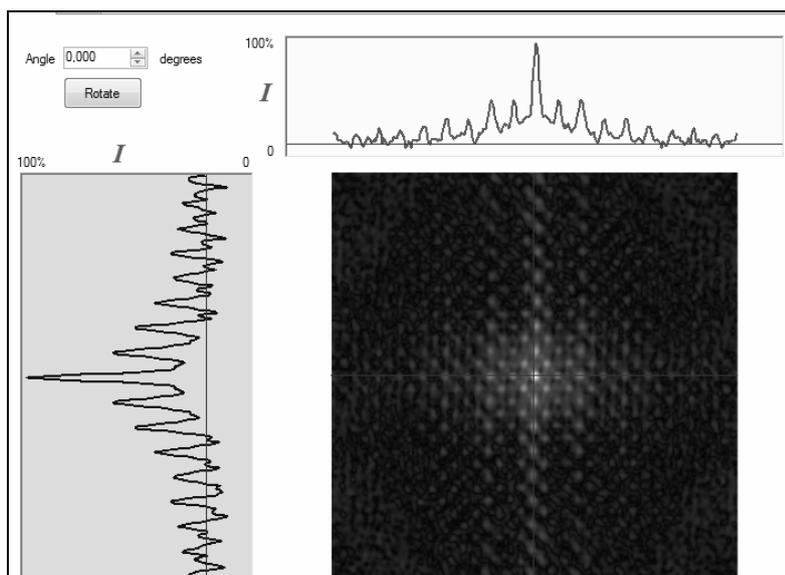


Рис. 2

Задача поиска координат отдельных локальных максимумов интенсивности осложнена тем, что распределение интенсивности (как максимумы, так и минимумы) не является глад-

ким и имеет ложные максимумы (пики, находящиеся между реальными максимумами, но значительно меньшие их по величине). Согласно способу „однократного фурье-преобразования“ [8], эта задача решается введением уровня отсечки шума — линии, ниже которой распределение интенсивности не учитывается при автоматическом поиске максимума. Однако при двойном фурье-преобразовании график интенсивности становится более выпуклым к центру изображения и прямая линия в этом случае не может корректно отсечь шум. Вместо нее предлагается использовать параболическую кривую (пунктир, рис. 3), проходящую преимущественно между локальными максимумами и минимумами кривой интенсивности светового сигнала.

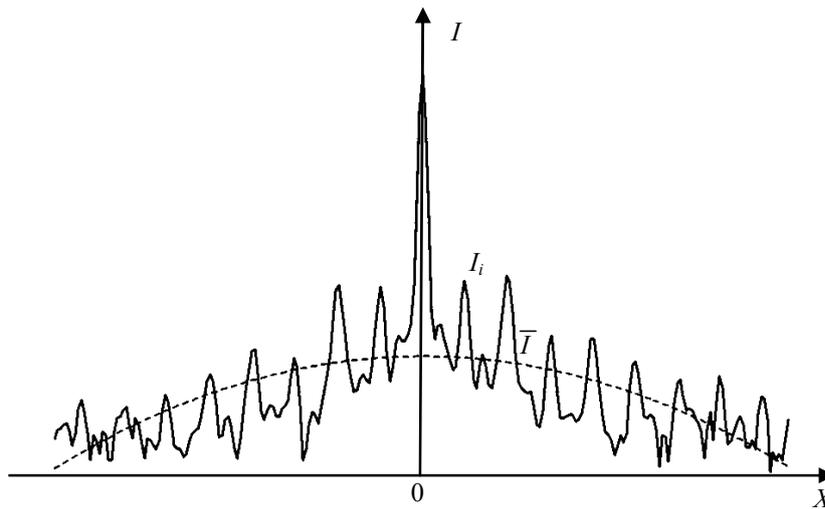


Рис. 3

Искомая параболическая кривая может быть описана уравнением:

$$\bar{I}(x) = b - ax^2. \tag{1}$$

Параметры a и b параболы определяются с помощью метода наименьших квадратов:

$$\varepsilon = \sum_i e_i = \sum_{i=0}^{W-1} [I_i - \bar{I}(x_i)]^2 = \sum_{i=0}^{W-1} [I_i^2 - 2I_i(b - ax_i^2) + (b - ax_i^2)^2] \rightarrow \min_{a,b}, \tag{2}$$

где I_i — значения функции распределения интенсивности для точек изображения с координатами x_i ; $i = 0, 1, 2, \dots, W$; W — ширина изображения дифракционной картины (вдоль оси X); $x_0 = 0, x_{-i} = -x_i$.

Соотношение между параметрами a и b можно определить из граничного условия:

$$\bar{I}(x_{W-1}) = b - ax_{W-1}^2 \equiv 0, \tag{3}$$

таким образом

$$b = ax_{W-1}^2 = a\mathbf{X}^2, \tag{4}$$

где $\mathbf{X} = x_{W-1}$.

После подстановки (4) в (2):

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^{W-1} [I_i^2 + 2aI_i(x_i^2 - \mathbf{X}^2) + a^2(x_i^2 - \mathbf{X}^2)^2]. \tag{5}$$

Минимальное значение функции $\varepsilon(a)$ определяется из условия нахождения экстремума — равенства нулю первой производной (5):

$$\frac{d\varepsilon}{da} = \sum_{i=0}^{W-1} [2I_i(x_i^2 - \mathbf{X}^2) + 2a_{\min}(x_i^2 - \mathbf{X}^2)^2] = 0. \tag{6}$$

При a_{\min} функция ε действительно будет иметь минимальное значение, так как

$$\frac{d^2\varepsilon}{da^2} = \sum_{i=0}^{W-1} [2(x_i^2 - \bar{X}^2)^2] > 0. \quad (7)$$

Из (6) и (4) следуют выражения параметров параболы $\bar{I}(x)$:

$$a_{\min} = \frac{\sum_{i=0}^{W-1} I_i(x_{W-1}^2 - x_i^2)}{\sum_{i=0}^{W-1} (x_{W-1}^2 - x_i^2)^2}, \quad (8)$$

$$b_{\min} = a_{\min} x_{W-1}^2. \quad (9)$$

Таким образом, определены параметры параболы (1), отсекающей примерно одинаковое число как локальных минимумов, так и локальных максимумов исходной кривой интенсивности светового сигнала.

На рис. 4 приведен график разности интенсивности исходного сигнала и осредненной интенсивности, рассчитанной с помощью (1) для каждой точки:

$$\Delta I = I_i - \bar{I}(x_i) = I_i - b_{\min} + a_{\min} x_i^2, \quad (10)$$

где коэффициенты a_{\min} и b_{\min} вычислены с помощью (8) и (9).

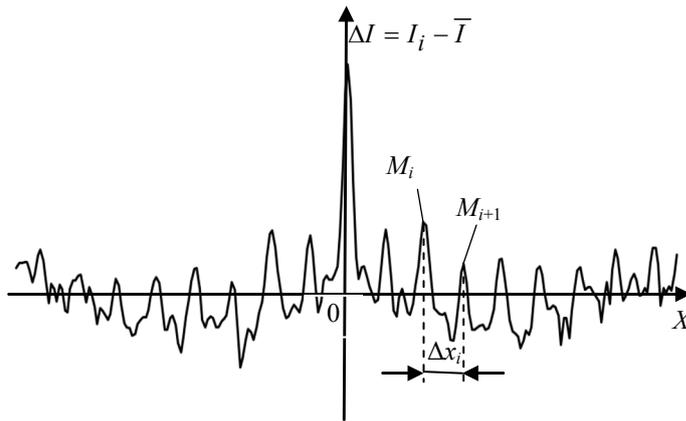


Рис. 4

Критерием того, является максимум реальным или шумом, может служить некоторый порог Δ . Если $\Delta I > \Delta$, максимум реален и его необходимо учитывать при анализе значений геометрических параметров исследуемого объекта. В противном случае его можно считать шумом. Значение критериального порога может зависеть от характеристик объекта исследования и устанавливаться при выполнении практических исследований.

На графике M_i — максимальные значения функции ΔI на каждом участке, являющиеся искомыми максимумами, а расстояние Δx_i между соседними максимумами M_i и M_{i+1} есть искомое расстояние для определения размеров периодического элемента исследуемой структуры вдоль оси X .

Численные эксперименты, проведенные для компьютерных изображений таких периодических структур, как внутренняя (огневая) стенка рубашки охлаждения жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), сетки вибрационных сит, профили наружного резьбового соединения и пр., показали, что предложенный метод позволяет определить 85 % дифракционных максимумов, соответствующих периодическим элементам контролируемых структур, с достоверной вероятностью 0,95. Таким образом, компьютерной программе, в которой реализован алгоритм по предлагаемому методу, достаточно определить координату максимума интенсивности на каждом таком участке. По разности координат между дифракционными макси-

мумами соседних участков могут быть с высокой точностью определены размеры периодических элементов структуры изделий (ширина каналов рубашек охлаждения камер ЖРД [11], размер ячеек вибрационного сита, шаг резьбы и пр.), которые являются наиболее энергонапряженными при работе изделий. Автоматический поиск локальных максимумов для распределений интенсивности, средняя линия которых может быть условно аппроксимирована выпуклой параболой, прост и может эффективно применяться наряду со способами, предложенными в работах [12, 13].

Заключение. Предлагаемый метод позволяет автоматизировать процесс определения локальных максимумов для кривых, построенных на основе экспериментальных либо расчетных данных. Это дает возможность использовать его в программах обработки дифракционных картин изображений и фурье-образов сигналов, а также других программах, в том числе для автоматического контроля качества [1] изделий с периодической структурой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Н. И., Садин Д. В. Неразрушающий контроль качества производства и испытания технологического оборудования комплексов. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. 60 с.
2. Лебедев Е. Л. Основы метрологии. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. 115 с.
3. Кофнов О. В. Система компьютерного моделирования дифракции для измерения геометрических параметров структуры текстильных материалов // Вестн. Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Сер. 1. Естественные и технические науки. 2014. № 2. С. 38—45.
4. Кофнов О. В. Моделирование процесса контроля периодических структур с применением автоматизированных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 10. С. 855—858.
5. Пат. 2508537 РФ, МПК G 01 N 21/898, G 01 N 33/36. Способ измерения геометрических параметров структуры текстильных материалов / П. Г. Шляхтенко, О. В. Кофнов, А. Е. Рудин. 27. 02.2014. Бюл. 6.
6. Кофнов О. В., Шляхтенко П. Г., Рудин А. Е. Использование двойного фурье-преобразования для контроля параметров геометрической структуры текстильных материалов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. 2013. № 3. С. 23—26.
7. Shlyakhtenko P., Kofnov O. Double Two-Dimensional Discrete Fast Fourier Transform for Determining of Geometrical Parameters of Fibers and Textiles // Fibers. 2013. N 1. P. 36—46.
8. Шляхтенко П. Г., Пименов В. И., Кофнов О. В. Использование двумерного дискретного преобразования Фурье для компьютерного анализа материала с повторяющейся структурой // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 7. С. 20—27.
9. Шляхтенко П. Г., Труевцев Н. Н. Дифракционный метод контроля геометрических параметров текстильных материалов по их дифракционным изображениям // Тр. МНК по совместному проектированию S/P-973658 (НАТО). 30 июня—1 июля 2004. С. 43—48.
10. Свид-во о гос. рег. программ для ЭВМ № 2012618350. Программа Фурье обработки микроизображений поверхности текстильных материалов для определения значений периодических параметров исследуемой структуры / П. Г. Шляхтенко, О. В. Кофнов, В. П. Нефедов. 14.09.2012.
11. Лебедев Е. Л., Добролюбов А. Н., Михайленко А. В., Лебедев А. С. Обзор, сравнительный анализ и перспективы развития автоматизированных оптических средств контроля геометрических параметров элементов ракетно-космической техники // Тр. НТК приборостроительных организаций Роскосмоса „Информационно-управляющие и измерительные системы-2016“. 2016. С. 163—167.
12. Cheng D., Schwartzman A. // Extremes. 2015. Vol. 18, is. 2. June. P. 213—240.
13. Vio R., Andreani P. // Astronomy & Astrophysics. 2016. Vol. 589, N A20. P. 1—7.

Сведения об авторах

Олег Владимирович Кофнов

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, кафедра информационных технологий; E-mail: kofnov@mail.ru

Евгений Леонидович Лебедев

— д-р техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра контроля качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники; E-mail: zlebedev@yandex.ru

Александр Владимирович Михайленко

— адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра контроля качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники; E-mail: tihaxis@mail.ru

Рекомендована кафедрой
информационных технологийПоступила в редакцию
10.12.16 г.

Ссылка для цитирования: Кофнов О. В., Лебедев Е. Л., Михайленко А. В. Определение координат локальных максимумов интенсивности светового сигнала дифракционной картины поверхности с периодической структурой // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 347—352.

DETERMINING COORDINATES OF LOCAL MAXIMA OF LIGHT SIGNAL INTENSITY IN DIFFRACTION PATTERN OF THE SURFACE WITH PERIODIC STRUCTURE

O. V. Kofnov¹, E. L. Lebedev², A. V. Mikhailenko²

¹St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
191186, St. Petersburg, Russia
E-mail: kofnov@mail.ru

²A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia

An automatic searching method for local maxima of light intensity distribution along diffraction pattern image is presented. The proposed approach consists in slicing the initial intensity oscillation diagram by approximation function for average values so that the required diffraction peaks will lie above the approximating curve, and therefore the local extrema can be found with any algorithm searching for maximum in an uninterrupted segment. Calculated coordinates of local maxima can be used for determining geometrical parameters of periodical structures with the double Fourier transform method. The method is recommended for the use in automatic quality control.

Keywords: local maxima, physical structure, Fourier transform, diffraction pattern, quality control

Data on authors

Oleg V. Kofnov

— PhD; St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Department of Information Technologies; E-mail: kofnov@mail.ru

Eugeny L. Lebedev

— Dr. Sci., Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Quality Control and Weapon Testing; E-mail: zlebedev@yandex.ru

Alexander V. Mikhailenko

— Adjunct; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Quality Control and Weapon Testing; E-mail: tihaxis@mail.ru

For citation: Kofnov O. V., Lebedev E. L., Mikhailenko A. V. Determining coordinates of local maxima of light signal intensity in diffraction pattern of the surface with periodic structure // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 4. P. 347—352 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-347-352