6. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника.—М.: Радио и связь, 1977.
7. Носов Ю. Р., Сидоров А. С. Оптроны и их применение.—М.: Радио и связь, 1981.
8. Кривоносов А. И. Оптоэлектронные устройства.—М.: Энергия, 1978.
9. Каган В. М., Войнилев А. И., Лукьянов Л. М. Системы связи УВМ с объектами управления в АСУ ТП.—М.: Сов. радио, 1978.
10. Руководство по эксплуатации масс-спектрометра ЭС-3103.—Черноголовский завод научно-технического объединения АН СССР, 1981.
11. Robert J., Weinkam and L. D'Angona. Accurate mass-measurement at low resolving power and mass-spectrometer // Computer Systems. Analytical Chemistry.—1979.—51, N 7.— P. 1074.

Поступило в редакцию 14 февраля 1991 г.

УДК 621.378 : 778.4

Н. И. Крайнюков, В. А. Сойфер, А. Г. Храмов

(Самара)

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРОВ ПОЛОС НА ДВУМЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОГРАММЕ

Рассмотрена задача выделения центров полос на голографических интерферограммах, полученных методом двух экспозиций и методом усреднения во времени. Предложен алгоритм выделения центров полос, основанный на локальной аппроксимации функции яркости. Приводится пример использования алгоритма обработки интерферограммы лопатки турбины компрессора авиационного двигателя.

Введение. В настоящее время интерференционные методы получили широкое распространение в научных исследованиях, производственной практике, технике и медицине. Интерференционная картина содержит информацию об изменении состояния исследуемого объекта в распределении интерференционных полос, поэтому быстрота и точность расшифровки интерферограммы являются условием практического применения этих методов. Расшифровка интерферограммы может проводиться по опорным линиям, по центрам полос [1, 2]. После нумерации линий центров полос осуществляется интерполяция фазовой функции между ними. Таким образом получаются значения фазовой функции на всей интерферограмме.

В настоящей статье предлагается метод выделения центров полос, основанный на локальной аппроксимации функции яркости.

Алгоритм выделения центров полос. Пусть $I(x, y)$ — функция яркости интерферограммы. Известно [3, 4], что для интерферограммы, полученной методом двух экспозиций, интенсивность в точке с координатами (x, y) выражается формулой

$$I(x, y) = A(x, y)(1 + B(x, y)\cos(\delta(x, y))), \qquad (1)$$

где $I(x, y)$ — интенсивность в точке с координатами (x, y); $A(x, y)$ — значение интенсивности света, пришедшего от объекта; $B(x, y)$ — контрастность; $\delta(x, y)$ — фазовая функция.

Функции $A(x, y)$ и $B(x, y)$ медленно меняющиеся, поэтому для простоты положим $A(x, y) = A$ и $B(x, y) = B$, где A, B — константы. Из формулы (1) видно, что координаты точки, лежащей в центре темной полосы, удовлетворяют соотношению $\delta(x, y) = \pi + 2\pi k$.

В случае интерферограммы, полученной методом усреднения во времени (см. [3, 4]), изображение объекта промодулировано системой интерференционных полос, которая описывается функцией Бесселя первого рода нулевого порядка. Центры темных полос представляют собой овраги функции $I(x, y)$, а точки, лежащие в центре светлых полос, — хребты функции $I(x, y)$. Выделение центров полос можно рассматривать как задачу выделения хребтов и оврагов на двумерной поверхности. В дальнейшем, без ограничения общности, задачу выделения центров полос будем рассматривать как задачу выделения центра темной полосы.

Пусть функция $I(x, y)$ дважды непрерывно дифференцируема. Разложим ее в ряд Тейлора в окрестности точки (x_0, y_0):

$$I(x, y) = I(x_0, y_0) + DIh + \frac{1}{2}h^{T}D^{2}Ih + o(\| h \|^2),$$

где $h = \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \end{pmatrix}$, $h^1 = x - x_0$, $h^2 = y - y_0$ — вектор-столбец; $h^{T} = \begin{pmatrix} h^1 & h^2 \end{pmatrix}$ — вектор-строка; $DI = \begin{pmatrix} \frac{\partial I}{\partial x} & \frac{\partial I}{\partial y} \end{pmatrix}$ — градиент функции $I(x, y)$; $D^2I = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{yx} & I_{yy} \end{pmatrix}$ — второй дифференциал функции $I(x, y)$; $o(\| h \|^2)$ — остаточный член ряда Тейлора функции $I(x, y)$.

Пусть $\lambda_1 > \lambda_2$ — собственные значения; e_1, e_2 — собственные векторы единичной длины матрицы вторых производных. Точка с координатами (x_0, y_0) является точкой оврага функции $I(x, y)$, если $\lambda_1 \geq 0$, и производная функции $I(x, y)$ по направлению собственного вектора e_1 равна нулю. Аналогично точка с координатами (x_0, y_0) является точкой хребта функции $I(x, y)$, если $\lambda_2 \leq 0$, и производная функции $I(x, y)$ по направлению собственного вектора e_2 равна нулю. Предлагаемый алгоритм выделения центров полос состоит из следующей последовательности действий:

— аппроксимация функции яркости $I(x, y)$ в квадратном или прямоугольном окне W шириной K функцией $F(x, y)$, имеющей аналитическое представление;

— нахождение точек, принадлежащих оврагу функции $F(x, y)$, с использованием приведенного выше условия;

— вычисление наименьшего расстояния r от центра окна до точек, принадлежащих оврагу.

Если расстояние r меньше или равно пороговому значению R, то центр окна принадлежит центру полосы. Если расстояние r больше порогового значения R, то центр окна не принадлежит центру полосы. Ширина линии центров полос в этом случае будет равна $2R$.

В качестве аппроксимирующей функции $F(x, y)$ возьмем полином второй степени от переменных (x, y):

$$F(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f.$$

Параметры a, b, c, d, e, f найдем, используя метод наименьших квадратов. Аппроксимация функции яркости полиномом $F(x, y)$ методом наименьших квадратов сглаживает экспериментальные данные, что позволяет уменьшить случайную погрешность. Найдем точки, принадлежащие оврагу функции $F(x, y)$. Градиент функции $F(x, y)$:

$$DF = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial y} \end{pmatrix} = (2ax + cy + d,\ \ 2yb + cx + e).$$

Второй дифференциал функции $F(x, y)$:

$$D^2F = \begin{pmatrix} 2a & c \\ c & 2b \end{pmatrix}.$$

Собственные значения квадратичной формы $D^2F(x, y)$:

$$\lambda_1 = a + b + \sqrt{(a - b)^2 + c^2};$$

$$\lambda_2 = a + b - \sqrt{(a - b)^2 + c^2};\ \ (\lambda_1 > \lambda_2).$$

Рис. 1

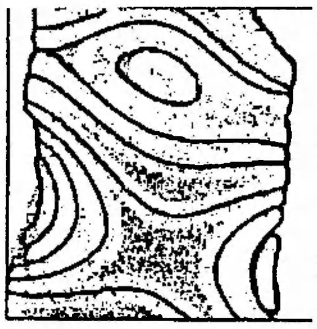

Рис. 2

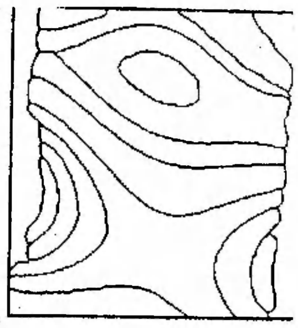

Рис. 3

Для того чтобы в точке (x, y) был овраг функции $F(x, y)$, значение λ_1 должно быть больше либо равно нулю. Собственный вектор, соответствующий собственному значению λ_1, будет $e_1 = \frac{1}{\sqrt{(2a - \lambda_1)^2 + c^2}} \begin{pmatrix} -c \\ 2a - \lambda_1 \end{pmatrix}$. Точки оврага функции $F(x, y)$ удовлетворяют соотношению

$$\frac{dF}{de_1} = (DF, e_1) = 0.$$

Подставляя соответствующие значения, получим уравнение прямой, описывающей точки оврага функции $F(x, y)$:

$$-c\lambda_1 x + (4ab - c^2 + \lambda_1)y - dc + e(2a - \lambda_1) = 0.$$

Зная уравнение прямой, нетрудно подсчитать расстояние r от этой прямой до центрального элемента окна W.

Применение метода. На рис. 1 представлен фрагмент интерферограммы, полученной при вибропрочностных испытаниях лопатки компрессора газотурбинного двигателя методом усреднения во времени в КНПО «Труд» [5, 6]. Ввод изображения производился с телевизионной камеры с помощью специализированного устройства ввода изображений. Размер изображения 512×512 отсчетов, 256 градаций яркости (1 байт на отсчет). Результат выделения центров темных полос представлен на рис. 2 (ширина окна $K = 7$, пороговое расстояние $R = 1{,}5$). На рисунке видны линии центров темных полос, большое количество ложных точек. Ложные точки появляются из-за шумов при регистрации и вводе изображения. Для того чтобы уменьшить количество ложных точек, выполняется процедура коррекции изображения, которая может проводиться с использованием алгоритмов скелетизации изображений [7]. Результаты обработки представлены на рис. 3. Предложенный алгоритм выделения центров полос можно применять как для одномерных интерферограмм, так и для двумерных (см. [1]) независимо от метода получения интерферограммы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ярославский Л. П., Фаянс А. М.** Исследование возможностей обработки и анализа интерферограмм на ЦВМ // Иконика. Цифровая голография. Обработка изображений.—М.: Наука, 1975.
2. **Храмов А. Г.** Методы восстановления интерферограмм на ЭВМ // Оптическая запись и обработка изображений: Сб. науч. тр.—Куйбышев: КуАИ, 1988.
3. **Островский Ю. И., Щепинов В. П., Яковлев В. В.** Голографические методы измерения деформаций.—М.: Наука, 1988.
4. **Вест Ч.** Голографическая интерферометрия.—М.: Мир, 1982.

5. **Домбровский С. И., Елсневский Д. С., Петроченко А. Е., Шапошников Ю. Н.** Возможности голографической интерферометрии и их реализация в авиационном двигателестроении // Применение лазеров в науке и технике: Тез. докл. науч.-техн. семинара.—Тольятти: ВАЗ, 1989.

6. **Крайнюков Н. И., Сойфер В. А., Храмов А. Г., Шапошников Ю. Н.** Прикладное програмное обеспечение системы обработки интерферограмм // Методы и применение голографической интерферометрии: Тез. докл. Всесоюз. симп.—Куйбышев: КуАИ, 1990.

7. **Павлидис Т.** Алгоритмы машинной графики и обработки изображений.—М.: Радио и связь, 1986.

Поступило в редакцию 23 сентября 1991 г.