

*Н. У. Крайнюков, В. А. Сойфер, А. Г. Храмов*

**АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ ВИБРОСМЕЩЕНИЙ  
ПО ДАННЫМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК  
МЕТОДОМ УСРЕДНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ**

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время голографические интерференционные методы широко используются при измерении деформации в экспериментальной механике твердого тела. Методы голографической интерферометрии незаменимы при вибропрочностных исследованиях объектов авиационной техники.

Бесконтактность, высокая точность, большая информативность, наличие соответствующей аппаратуры и методик способствуют распространению голографической интерферометрии и в других областях науки, техники, медицины. Интерференционная картина содержит информацию об изменении состояния объекта в структуре интерференционных полос, поэтому обработка интерферограмм невозможна без использования современных методов обработки изображений, прикладной математики и вычислительной техники. Сложность исследуемого объекта приводит к необходимости разработки новых методов и алгоритмов анализа интерферограмм, а также создания испытательных стендов и аппаратуры на базе отечественной техники.

Настоящая статья посвящена описанию математических методов анализа интерферометрических данных, полученных методом усреднения во времени, системного и прикладного программного обеспечения для их анализа.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИНТЕРФЕРОГРАММ

### 2.1. Модель регистрации изображений голографических интерферограмм

Для анализа полей вибросмещений основным методом регистрации голограммы исследуемого объекта является метод усреднения во времени [1, 2, 3].

В методе усреднения во времени голограмма регистрируется непрерывно в течение достаточно длительного промежутка времени, значительно превышающего период колебаний объекта.

В этом случае распределение яркости изображения интерферограммы имеет вид [1, 2, 3]:

$$I(\vec{u}) = I_0 J_0^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \vec{K}(\vec{x}) \cdot \vec{D}(\vec{x}) \right), \quad (2.1)$$

- где  $J_0(\cdot)$  - функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  
 $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$  - координаты точки объекта;  
 $\vec{u} = (u_1, u_2)$  - координаты в плоскости изображения;  
 $\vec{K}(x_1, x_2, x_3)$  - вектор чувствительности;  
 $\vec{D}(x_1, x_2, x_3)$  - вектор перемещения точки объекта;  
 $\lambda$  - длина волны когерентного источника;  
 $\vec{u} = \vec{P}(\vec{x})$  - уравнение, описывающее связь физических координат точки объекта и координат этой же точки на изображении;  
 $I_0$  - константа.

### 2.2. Метод определения поля вибросмещений

Задача расшифровки интерферограмм в общем случае заключается в определении исследуемых параметров объекта, а в данном случае - в

восстановлении поля вибро смещений  $\vec{D}(\vec{x})$  (т. е. поля амплитуд вибрации) по наблюдаемому изображению интерферограммы. Для полного восстановления вектора вибро смещений  $\vec{D}(\vec{x})$  необходимо как минимум три интерферограммы.

Запишем уравнения (2.1) для М-интерферограмм:

$$I^{(m)}(\vec{u}^{(m)}) = I_0^{(m)} J_0^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \vec{K}^{(m)}(\vec{x}) \cdot \vec{D}(\vec{x}) \right), \quad (2.2)$$

$$m = \overline{1, M}$$

где  $m$  - номер интерферограммы;  
 $M$  - число зарегистрированных интерферограмм;  
 $\vec{u}^{(m)} = \vec{P}^{(m)}(\vec{x})$  - уравнение связи координат.

Решение системы уравнений (2.2) относительно вектора перемещений производится в два этапа.

Обозначим:

$$N^{(m)}(\vec{x}) = \frac{1}{\lambda} \vec{K}^{(m)}(\vec{x}) \cdot \vec{D}(\vec{x}), \quad (2.3)$$

где  $N^{(m)}(\vec{x})$  - номер интерференционной полосы, соответствующей точке объекта на  $m$ -м изображении интерферограммы.

На первом этапе производится восстановление функций  $N^{(m)}(\vec{x})$  по каждой наблюдаемой интерферограмме  $I^{(m)}(\vec{u}^{(m)})$  из уравнений:

$$I^{(m)}(\vec{u}^{(m)}) = I_0^{(m)} J_0^2 \left( 2\pi N^{(m)}(\vec{x}) \right), \quad (2.4)$$

$$\vec{u}^{(m)} = \vec{P}^{(m)}(\vec{x}), \quad m = \overline{1, M}.$$

При решении системы (2.4) для каждого  $m$  удобно записать уравнение относительно координат в плоскости изображения интерферограммы. Для этого необходимо ввести в рассмотрение уравнение, описывающее форму поверхности исследуемого объекта:

$$f(\vec{x}) = 0. \quad (2.5)$$

Решая систему из уравнений  $\vec{u}^{(m)} = \vec{P}^{(m)}(\vec{x})$  и (2.5), можно получить связь между физическими координатами точки поверхности объекта и координатами в плоскости изображения:

$$\vec{x} = \vec{Q}^{(m)}(\vec{u}^{(m)}). \quad (2.6)$$

Функцию  $\vec{Q}^{(m)}(\cdot)$ , позволяющую переходить от координат в плоскости изображения к трехмерным координатам на поверхности объекта, будем называть функцией обратного проецирования.

Теперь систему (2.4) можно записать в скалярном виде (индекс  $m$  опускаем,  $\vec{u} = (u_1, u_2)$ ):

$$I(u_1, u_2) = I_0 J_0^2(2\pi \cdot \nu(u_1, u_2)), \quad (2.7)$$

где  $\nu(u_1, u_2)$  - номер интерференционной полосы, соответствующей точке изображения интерферограммы.

На рис.1 представлена взаимосвязь координат точек поверхности объекта и их проекций на плоскость изображения интерферограммы, а также взаимосвязь функций номеров полос  $N(\vec{x})$  и  $\nu(\vec{u})$ .

Таким образом, уравнение (2.7) является основным на первом этапе расшифровки интерферограмм. Решение этого уравнения с использованием методов обработки изображений описывается ниже.

На втором этапе расшифровки интерферограммы для произвольной точки  $\vec{x}$  поверхности объекта определяется вектор смещения из системы линейных уравнений (2.4). Опуская аргумент  $\vec{x}$ , эту систему можно записать в матричном виде:

$$K \cdot \vec{D} = \lambda \vec{N}, \quad (2.8)$$

где  $\vec{N} = (N^{(1)}, \dots, N^{(M)})^T$  - вектор номеров полос ( $M \times 1$ ),  
 $K = (\vec{K}^{(1)}, \dots, \vec{K}^{(M)})^T$  - матрица чувствительности ( $M \times 3$ );  
 $\vec{D} = (d_1, d_2, d_3)^T$  - вектор смещения ( $3 \times 1$ ).



$$x = Q(u)$$

$$N(x_1, x_2, x_3) \longleftrightarrow \nu(u_1, u_2)$$

$$u = P(x)$$

Рис. 1. Связь координат точки на поверхности объекта и на изображении

В общем случае решение системы (2.8) производится с использованием методов регуляризации или методом наименьших квадратов (для  $M > 3$ ), например:

$$\hat{D} = (K^T K)^{-1} K^T \hat{N}. \quad (2.9)$$

### 3. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

На основе методики, изложенной в п. 2, разработаны алгоритмы анализа интерферограмм. Обработка интерферограммы производится в несколько этапов:

- ввод изображения интерферограммы;
- выделение центров полос;
- редактирование и уточнение изображения;
- нумерация полос;
- восстановление поля перемещений;
- геометрическая привязка к исследуемому объекту;
- сканирование поля перемещений;
- документирование результатов.

#### 3.1. Ввод изображения интерферограммы

Ввод изображения интерферограммы осуществляется специализированными модулями ввода/вывода изображений. Размеры изображения 256×256, 512×512, 256 градаций яркости (1 байт на отсчет).

#### 3.2. Алгоритм выделения центров полос на изображении интерферограммы

Рассмотрим основное уравнение интерферограммы (2.7), записанное для дискретных координат:

$$I(m, n) = I_0 J_0^2(2\pi\nu(m, n)). \quad (3.1)$$

где  $(m, n)$  - целочисленные координаты в плоскости изображения;

$I(m, n)$  - отсчеты функции яркости изображения;

$\nu(m, n)$  - отсчеты функции номера полосы.

Конечной целью является восстановление функции  $\nu(m, n)$  по наблюдаемым отсчетам изображения  $I(m, n)$ . Сложность решения поставленной задачи обусловлена следующими причинами:

- 1) нелинейность модели наблюдения,
- 2) наличие шумов при регистрации изображения интерферограммы,
- 3) нелинейность при регистрации функции яркости устройством ввода изображений.

Перечисленные причины препятствуют оптимальному по какому-либо критерию решению поставленной задачи в рамках статистической теории оценивания. Поэтому используется эмпирический метод восстановления

интерферограммы по опорным линиям [3], т.е. по линиям экстремумов интерференционной картины. После выделения линий экстремумов производится расчет поля смещений на этих линиях и интерполяция на все изображение.

Выделение линий экстремумов (минимумов и/или максимумов) интерференционной картины основано на методе локальной квадратичной аппроксимации. Основная идея метода локальной квадратичной аппроксимации заключается в аппроксимации по методу наименьших квадратов функции яркости изображения в пределах некоторой области скользящего окна поверхностью второго порядка, определении положения главной оси этой поверхности. Если главная ось проходит достаточно близко от текущего положения центра окна, то считается, что центральная точка лежит на линии экстремумов [3].

Очевидно, что рассмотренный метод позволяет обойтись без предварительной линейной фильтрации, т.к. локальная аппроксимация квадратичной поверхностью обладает сглаживающими свойствами. Однако может потребоваться последующая логическая фильтрация бинарного изображения для получения линий единичной толщины и восстановления связности линий.

Для получения линий единичной толщины используется логический фильтр с маской  $3 \times 3$ . Значение центрального элемента окна задается в виде таблицы на 256 элементов (восемь соседних элементов окна). Таблица составлена таким образом, чтобы сохранялись линии, имеющие единичную (один пиксел) толщину, и обеспечивалась 8-точечная связность.

### 3.3. Алгоритмы интерполяции поля вибросмещений

Интерполяция поля вибросмещений между линиями центров полос позволяет получить поле вибросмещений в любой точке объекта. Эта задача по существу является задачей интерполяции двумерной поверхности по линиям уровня постоянного значения.

Для решения этой задачи предлагается несколько алгоритмов:

- прямые методы интерполяции;
- методы, улучшающие прямые методы интерполяции.

Прямые методы интерполяции позволяют получить начальное приближение поля вибросмещений объекта. Начальное приближение может быть улучшено по критерию минимума квадрата градиента поверхности.

Пусть  $V$  - множество дифференцируемых функций с интегрируемым квадратом градиента на  $\Omega = [a_1, b_1] \times [a_2, b_2]$ , таких, что на кривых  $l_1, l_2, \dots, l_n$  значение функции равно  $F_1, F_2, \dots, F_n$  соответственно. В качестве интерполирующей функции будем выбирать такую функцию  $F(x, y)$ , что

$$\iint_{\Omega} (F_x^2 + F_y^2) dx dy \longrightarrow \min. \quad (3.2)$$

Известно, что экстремалами этого функционала являются гармонические функции, т. е. функции, удовлетворяющие уравнению Лапласа:

$$F_{xx} + F_{yy} = 0. \quad (3.3)$$

Для решения уравнения Лапласа воспользуемся разностной схемой «крест», такой, что значения функции на линиях  $l_1, \dots, l_n$  остаются постоянными:

$$F_{i,j}^{(k+1)} = \begin{cases} \frac{1}{4} (F_{i-1,j}^{(k)} + F_{i+1,j}^{(k)} + F_{i,j-1}^{(k)} + F_{i,j+1}^{(k)}), & (i,j) \notin (l_1, \dots, l_n) \\ F_m, & (i,j) \in l_m, \quad 1 \leq m \leq n, \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $F_{i,j}^{(k)}$  - значение функции на  $k$  итерации в точке  $(ih, jh)$  ( $h$  - параметр разбиения).

### 3.4. Алгоритмы геометрической привязки

Геометрическая привязка к физической системе координат исследуемого объекта позволяет сопоставить каждой точке объекта смещение в этой точке.

В качестве модели преобразования от физической системы координат  $(x_1, x_2, x_3)$  исследуемого объекта в экранные координаты  $(u_1, u_2)$  используется преобразование центрального проецирования с неизвестным центром проекции (рис. 2).

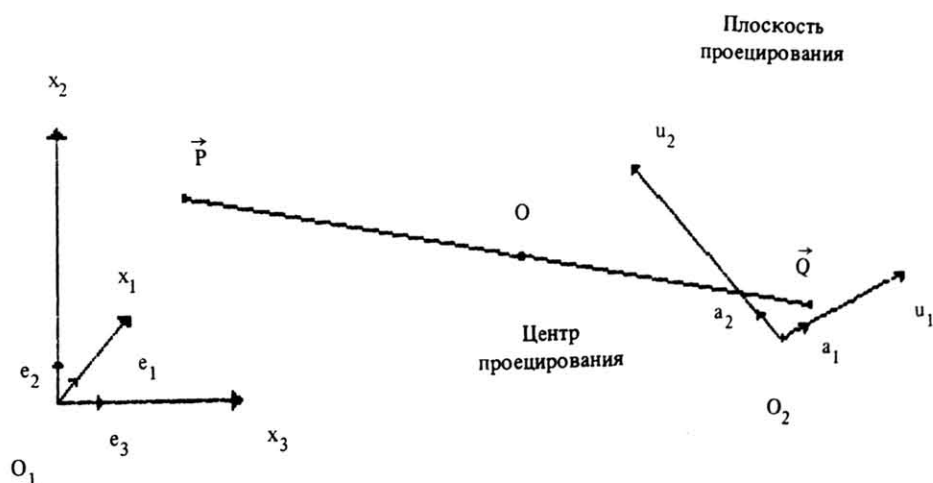


Рис. 2. Модель преобразования физической системы координат в экранную

Нетрудно показать, что связь координат  $(u_1, u_2)$  точки  $\vec{Q}$  в системе экранных координат  $(a_1, a_2)$  с физическими координатами  $(x_1, x_2, x_3)$  точки  $\vec{P}$  исследуемого объекта в системе физических координат с ортонормированным базисом  $\{l_1, l_2, l_3\}$ , записывается в виде:

$$u_1 = \frac{A_1 x_1 + B_1 x_2 + C_1 x_3 + D_1}{A_2 x_1 + B_2 x_2 + C_2 x_3 + D_2},$$

$$u_2 = \frac{A_3 x_1 + B_3 x_2 + C_3 x_3 + D_1}{A_2 x_1 + B_2 x_2 + C_2 x_3 + D_2}.$$
(3.5)

В параксильном приближении ввиду малости углов зрения можно принять закон перехода от физических координат в экранные следующим образом:

$$\begin{aligned} u_1 &= ax_1 + bx_2 + cx_3 + d, \\ u_2 &= ex_1 + fx_2 + gx_3 + h. \end{aligned}$$
(3.6)

Коэффициенты  $a, b, c, d, e, f, g, h$  находятся методом наименьших квадратов с использованием опорных точек (маркеров), нанесенных на исследуемый объект. Для нахождения коэффициентов  $a, b, c, d, e, f, g, h$  число опорных точек должно быть не меньше четырех.

#### 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Система обработки интерферограмм разработана для ЭВМ типа СМ-1420, СМ-1600 в операционной системе ОС РВ и для персональных ЭВМ типа ЕС-1840, ЕС-1841, Нейрон, Правец-16, Искра-1030, IBM PC/XT/AT в операционной системе MS DOS.

##### 4.1. Система обработки интерферограмм для ЭВМ СМ-1420

Система автоматизированной обработки интерферограмм на базе управляющей мини-ЭВМ СМ-1420 реализована в операционной системе ОС РВ.

Хранение обрабатываемых изображений организовано во внешней памяти. База данных системы включает в себя «рабочий файл» на магнитном диске, «архив» на магнитной ленте (МЛ), одно или несколько запоминающих устройств (ЗУ) изображений - модулей КАМАК.

Обработка ведется в режиме обмена данными в оперативной памяти, рабочим файлом и ЗУ изображений. Архив на МЛ служит для долговременного хранения обрабатываемых изображений.

Изображения в рабочем файле и архиве представлены в виде наборов данных, называемых полями.

Программное обеспечение системы обработки изображений написано на языке ФОРТРАН, подпрограммы обмена с КАМАК модулями на MACRO-11 в операционной системе ОС-РВ [4].

##### 4.2. Система обработки интерферограмм для ПЭВМ

Хранение обрабатываемых изображений организовано во внешней памяти. Каждое изображение представляет собой двоичный файл, имеющий определенную структуру.



Обработка ведется в режиме обмена данными в оперативной памяти. Программное обеспечение системы обработки изображений написано на языке СИ в операционной системе MS DOS.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опытная эксплуатация системы для измерения полей вибросмещений при испытаниях лопаток авиационных двигателей показала работоспособность разработанных методов, алгоритмов, аппаратуры.

Эффективность системы определяется сокращением затрат времени на обработку данных. Полный цикл обработки от ввода изображения интерферограммы до вывода протокола испытаний для изображения  $256 \times 256$  отсчетов составляет около 1 ч.

Дальнейшее совершенствование системы обработки интерферограмм проводится в следующих направлениях:

- совершенствование алгоритмов обработки;
- создание и совершенствование базы данных изображений интерферограмм и исследуемых объектов.

Ниже представлены результаты обработки интерферограммы изделия (рисунки 3, 4, 5, 6).



Рис. 3. Ввод интерферограммы

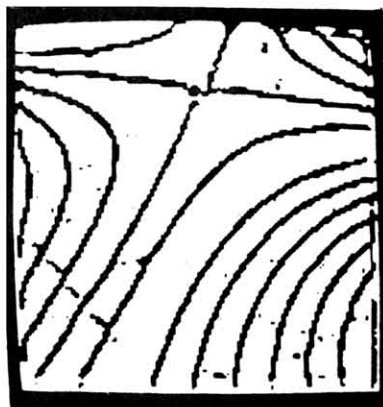


Рис. 4. Выделение центров полос

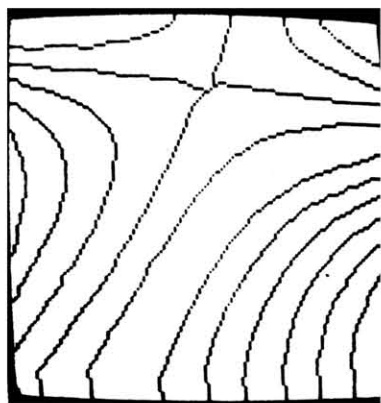


Рис. 5. Графическое редактирование линий центров полос и скелетизация



Рис. 6. Восстановление фазовой поверхности на линиях центров полос и интерполяция фазовой поверхности

## Литература

1. *Островский Ю.И., Щепнов В.П., Яковлев В.В.* Голографические методы измерения деформаций. М.: Наука, 1988. - 248 с.
  2. *Ярославский Л.П., Фаянс А.М.* Исследование возможностей обработки и анализа интерферограмм на ЦВМ // Иконика. Цифровая голография. Обработка изображений. М.: Наука, 1975, с. 24-49.
  3. *Храмов А.Г.* Методы восстановления интерферограмм на ЭВМ // Оптическая запись и обработка информации: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ.
  4. *Виттик В.А., Сергеев В.В., Сойфер В.А.* Обработка изображений в автоматизированных системах научных исследований. М.: Наука, 1982. - 214 с.
-