

ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.378.9 : 778.4

Е. Н. ДЕНЕЖКИН, С. П. ИЛЬНИХ, В. А. ХАНДОГИН
(Новосибирск)

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ РАСШИФРОВКА ИНТЕРФЕРОГРАММ НА ОСНОВЕ ФАЗОВЫХ ПСЕВДОСДВИГОВ. Ч. III. РОДСТВЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ

В настоящем, заключительном, сообщении исследованы наиболее важные в прикладном отношении модификации основного алгоритма расшифровки с использованием гомоморфной фильтрации поля яркости [1, 2]. Ранее основной алгоритм расшифровки рассматривался на примере двухэкспозиционной голографической интерферометрии, что позволяет распространить его на голографическую топографию, голографическую интерферометрию в сходящихся и во встречных пучках, интерферометрию сфокусированных изображений и т. д. Представленные здесь видоизменения основного алгоритма расширяют область его применений на задачи виброметрии, количественный анализ муаровых картин и неразрушающий контроль на основе муара интерференционных полос. Приведенный в заключительной части пример реализации фазового псевдосдвига путем вариации чувствительности интерферометра иллюстрирует универсальность основного принципа расшифровки интерферограмм и широкие возможности для его реализации.

Расшифровка муаровых картин. Как известно, особенность муарограмм по сравнению с голографическими интерферограммами состоит в том, что высокочастотная составляющая шумов имеет ярко выраженную анизотропию, обусловленную ориентацией растров. Анизотропия шума, в частности, может быть использована для эффективной фильтрации низких частот и устранения исходных растров. Другие отличительные особенности муарограмм связаны с интерпретацией полос и поэтому не имеют существенного значения при расшифровке.

С целью оценки эффективности гомоморфной фильтрации муарограмм приведем результаты для третьего типа тестового поля фазы Φ_3 [2, формула (1)]. Интерферирующие растры синтезируются по правилам $I_{1,2} \sim (1 + \cos(\Omega \pm \Phi_3))$, где $\Omega = (\pi N/128)(x + y)$, $(N/256)$ — частота растров. Таким образом, муаровые полосы связаны только с полем $\Phi_3(x, y)$, что наглядно отражается и в поле яркости муарограммы на рис. 1, а. После фильтрации исходных растров путем двукратного осреднения яркости по области 7×7 элементов (рис. 1, б) осуществлена расшифровка по последовательности (7), рассмотренной во втором сообщении [2]. Картина средин полос (рис. 1, в) и полное поле фазы (рис. 1, г) соответствуют точным значениям этих параметров. Погрешность полной фазы по всей области муарограммы не превышает 2—3%. Это несколько хуже, чем погрешность расшифровки тестовой интерферограммы аналогичного вида [2, рис. 5], так как малые флуктуации яркости от исходных растров сохраняются из-за неидеальной характеристики осредняющего фильтра.

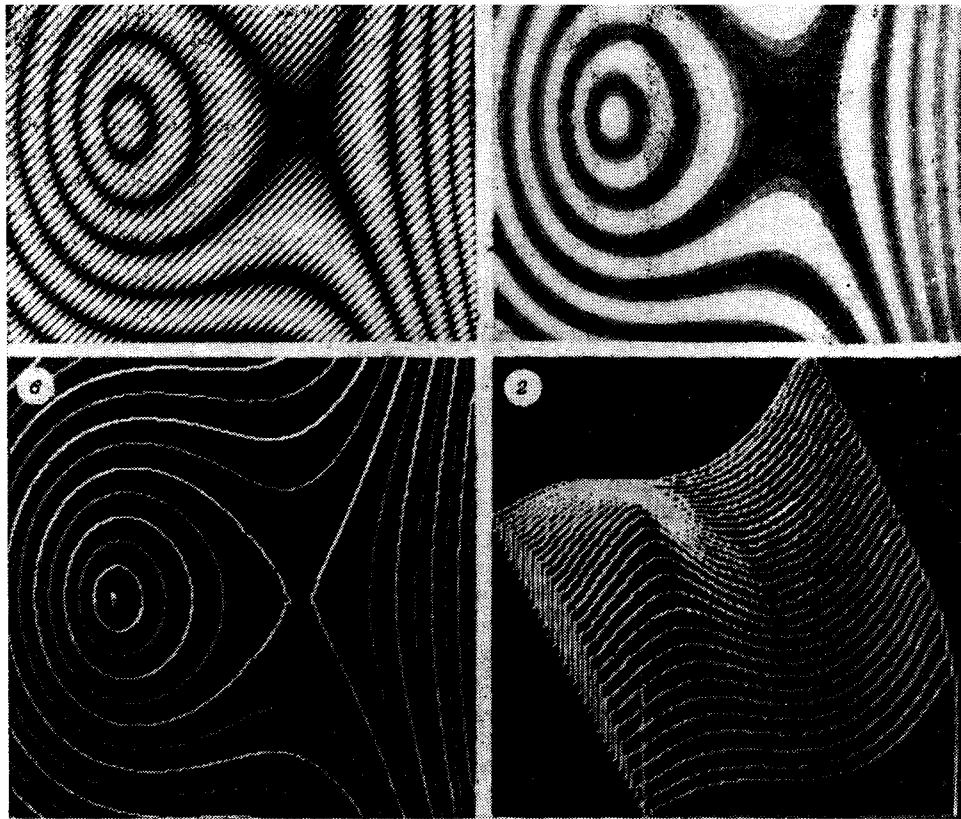


Рис. 1

Совместный анализ двух интерферограмм. Такая задача часто возникает в приложениях, например, при измерении плоского поля перемещений, выполняемом с помощью многоголограммного интерферометра. Особенности совместной обработки двух интерферограмм зависят от количества интерференционных полос на них. Если количество полос мало, а их шаг отвечает условию (2) из [2], то совместная расшифровка должна выполняться по общему правилу путем последовательного применения основного алгоритма к каждой из двух интерферограмм. Если количество полос велико, то в силу условия (3) из [2] возрастет погрешность расшифровки по основному алгоритму и прямое применение его оказывается нецелесообразным. Указанная ситуация возникает в задаче контроля аномалий внутренней структуры тонкостенных конструкций, которую и рассмотрим более подробно.

В большинстве задач контроля полная фаза интерференционных полос $\Phi(x, y)$ является суперпозицией двух составляющих общего уровня фазы (Φ_0) и возмущения, вызванного влиянием внутренней структуры (Φ_*):

$$\Phi(x, y) = \Phi_0(x, y) + \Phi_*(x, y).$$

Причем возмущение Φ_* значительно меньше общего уровня фазы Φ_0 , который затеняет полезную информацию о структурных аномалиях. В результате для решения задачи контроля необходимо анализировать интерферограммы с большим количеством полос.

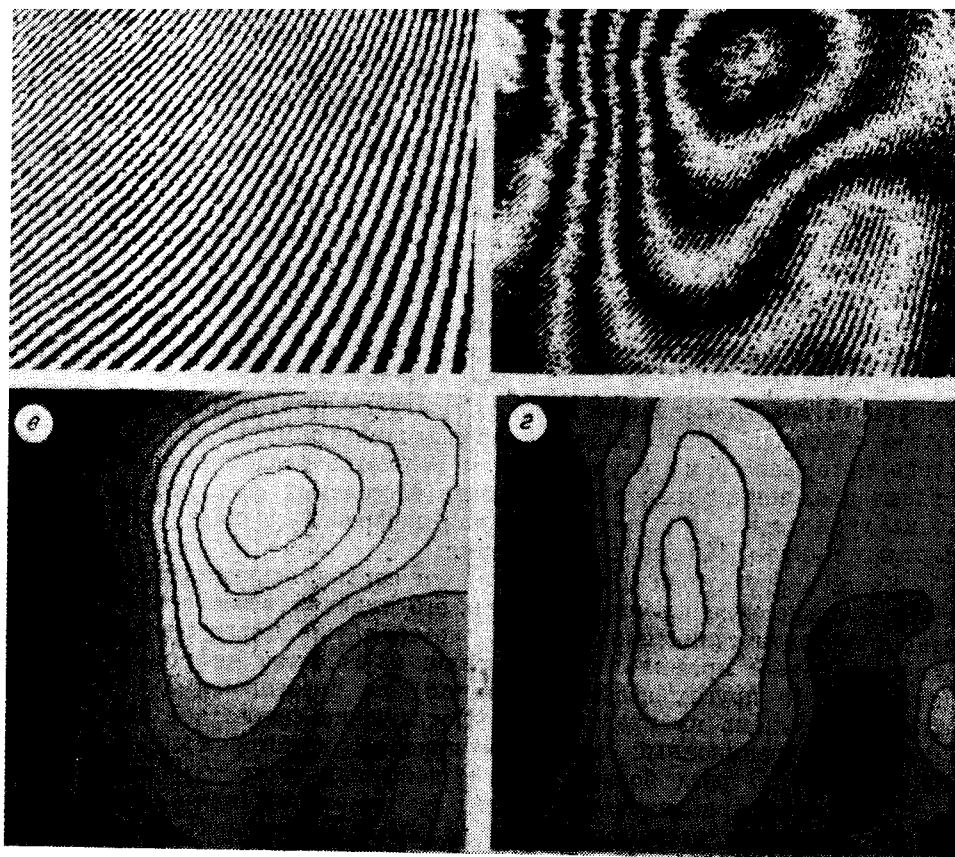


Рис. 2

Например, при исследовании полой лопатки газотурбинного двигателя информативные фрагменты интерферограмм содержат около 70 полос на 256 элементах разрешения. Совместная обработка двух интерферограмм, полученных для противоположных сторон лопатки, позволяет исключить общий уровень фазы $\Phi_0(x, y)$. Однако прямое применение основного алгоритма расшифровки характеризуется недопустимо высоким уровнем погрешности $|\delta\Phi_*| \approx |\delta\Phi| \leq \pi$ и не представляет интереса. Поэтому для явного выделения возмущений интерференционных полос использована предобработка интерферограмм на основе цифровой реализации муарового эффекта [3] с последующей расшифровкой муарограмм по основному алгоритму. Последовательность этапов контроля внутренней структуры лопатки состоит из следующих операций.

1. Одновременная регистрация двух интерферограмм противоположных сторон лопатки в двухголограммном интерферометре.
2. Согласованный ввод интерферограмм в память ЭВМ.
3. Улучшение полос с помощью преобразований вида (рис. 2, а) $I_k(x, y) \rightarrow J_k(x, y) = M(1 + \text{sign } I'(x, y))$; $M = \text{const}$; $k = 1, 2$.
4. Получение муаровой картины типа M_f с фильтрацией исходных растров путем их удвоения [3]: $M_f = J_1 J_2 - M(J_1 + J_2) + 2M^2$, которая связана только с возмущением фазы $\Phi_*(x, y)$ (рис. 2, б).
5. Расшифровка муарограммы по основному алгоритму с реконструкцией возмущения фазы и ее производных (рис. 2, в, г).

6. **Формулировка заключения о влиянии внутренней структуры на основе данных о возмущении фазы и ее производных.**

Эффективность указанной последовательности с использованием муаровой предобработки иллюстрируется затратами машинного времени. Наиболее трудоемким и продолжительным является здесь пятый этап расшифровки муарограммы, особенности которого описаны выше. Полное время контроля только в 1,5 раза больше времени выполнения самого продолжительного 5-го этапа.

Расшифровка интерферограмм, записанных методом усреднения во времени. Как известно [4], метод усреднения во времени является основным интерферометрическим методом исследования собственных форм колебаний и широко используется в исследовательской и производственной практике. Его отличительная особенность состоит в том, что поле яркости интерферограмм описывается квадратом функции Бесселя первого рода нулевого порядка, а не косинусоидой, как это требуется для гомоморфной фильтрации по основному алгоритму расшифровки. Однако основной принцип описанных ранее формализаций алгоритма [1, 2], состоящий в осуществлении фазовых псевдосдвигов, применим также и в этом случае. В точной записи разрешающие формулы задачи расшифровки интерферограмм с усреднением являются следствиями известных правил сложения, умножения и сдвига бесселевых функций, но имеют очень громоздкий вид, неудобный для цифровой реализации на стандартных микроЭВМ общего применения.

Более перспективным представляется подход, основанный на замене точного представления поля яркости его главной асимптотикой, полученной методом стационарной фазы, которая уже имеет требуемый косинусоидальный профиль. Возникающие из-за этого деформации средин полос (и других изофазных линий) не превышают 5—10 %, что вполне приемлемо на практике [4]. Исключение составляет лишь главный интерференционный максимум яркости, в котором цена полосы примерно в 1,5 раза больше, чем в побочных экстремумах [4].

Указанный приближенный подход без изменений применим и в случае исследования негармонических колебаний, поскольку асимптотика поля яркости и здесь имеет косинусоидальный вид [5].

Выделение главного максимума удобно осуществить следующим образом. Формально допустим, что представление поля яркости в форме выражения (1) из [1] применимо и в окрестности главного максимума. Тогда средняя яркость $A(x, y)$, представляющая собой огибающую максимумов поля яркости, достигает наибольшего значения только на главном максимуме. Совмещая картины средин полос исходного поля яркости $I(x, y)$ и геометрические места максимума его среднего значения $A(x, y)$, однозначно выделяем главный интерференционный максимум.

Таким образом, последовательность расшифровки интерферограмм, записанных методом усреднения во времени, включает следующие этапы.

1. Ввод интерферограммы в ЭВМ (рис. 3, а).
2. Выделение средин полос и средней яркости по основному алгоритму расшифровки [1, 2] (рис. 3, б).
3. Выделение максимума средней яркости, совпадающего с серединой главного интерференционного максимума.

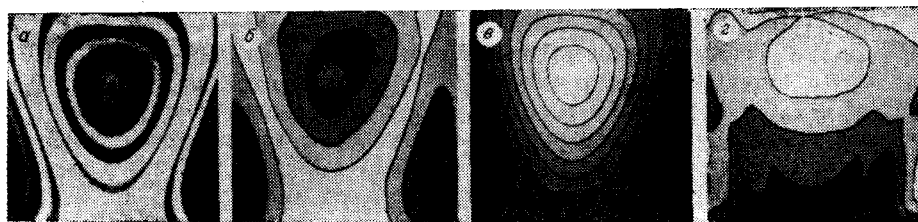


Рис. 3

4. Учет особенности главного максимума и построение полей амплитуд вибраций (рис. 3, *в*) и ее вторых производных (рис. 3, *з*).

Следует отметить, что выполнение операций по выделению главного максимума, которые существенно увеличивают затраты машинного времени, не всегда оправдано. Например, в наиболее важном случае исследования собственных форм изгибных колебаний основной интерес представляют экстремумы вторых производных поля амплитуд вибраций [4], которые никогда не совпадают с расположением главного максимума яркости, лежащего в окрестности точек перегиба поля амплитуд вибраций (см. рис. 3, *а*, *з*).

Фазовый псевдосдвиг на основе вариации чувствительности интерферометра. При выводе основной формы фильтра (4) — (7) из [1] фазовый псевдосдвиг осуществлен путем сдвига поля яркости интерферограммы. Однако сдвиг координат — это не единственный способ трансформации поля яркости, обеспечивающей выполнение условий фазовых псевдосдвигов (3) из [1]. Аналогичными свойствами обладают, например, масштабирование и повороты, в терминах которых формулируются разрешающие формулы расшифровки в полярных координатах.

Другой подход, иллюстрирующий универсальность главного принципа, основан на осуществлении фазовых псевдотрансформаций путем вариации чувствительности интерферометра. Для двухэкспозиционных голографических интерферограмм фаза $\Phi(x, y)$ имеет следующую структуру [4]:

$$\Phi(x, y) = (2\pi/\lambda) (\mathbf{R}_0(x, y) + \mathbf{R}_1(x, y)) \mathbf{u}(x, y), \quad (1)$$

где λ — длина волны лазера; $\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_1$ — орт-векторы направлений освещения и наблюдения соответственно (рис. 4); $\mathbf{u}(x, y)$ — поле перемещений поверхности объекта между экспозициями. Чувствительность интерферометра определяется вектором $(\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_1)$, который зависит как от текущей точки объекта, так и от положения реконструированного участка голограммы. Интерферограммы, восстановленные с разных участков голограммы, отличаются друг от друга. Отличия обусловлены вариациями фазы интерференционной картины, зависящей от изменений вектора чувствительности и уровня перемещений. Из (1) получаем

$$\Delta\Phi = (2\pi/\lambda) \mathbf{r} \mathbf{u}; \quad \mathbf{r} = \mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1, \quad (2)$$

где $\Delta\Phi$ — приращения фазы при изменении орта наблюдения на величину \mathbf{r} ; $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ — орты наблюдения для интерферограмм, восстановленных с первого и второго участков голограммы соответственно (см. рис. 4).

Если зарегистрировать поля яркости четырех или пяти интерферограмм, восстановленных с одной двухэкспозиционной голограммы так, чтобы орты наблюдения для них отличались на постоянную величину $\mathbf{R}_{i+1} - \mathbf{R}_i = \mathbf{r}, i = 1, 2, \dots, 5$, то можно восстановить поле фазы, отфильтровав низкочастотные шумы $A(x, y)$ и $V(x, y)$. В этом случае расшифровка осуществляется по формулам (4) — (9) из [1], в которых I_{n+i} отождествляется с полями яркости пяти указанных интерферограмм.

Как видно из (2), для осуществления фазового псевдосдвига требуется реконструкция разных участков голограммы, что приводит к увеличению ее размеров в 4—5 раз. Для оценки абсолютного увеличения размеров голограммы определим расстояние между соседними участками голограммы в наиболее невыгодном слу-

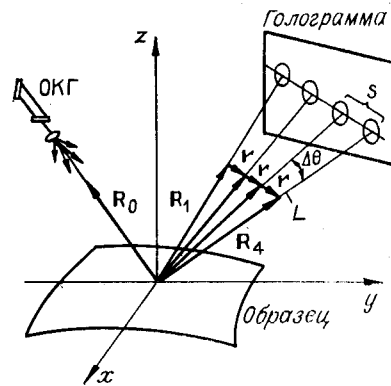


Рис. 4

чае, когда вектор \mathbf{r} направлен поперек вектора \mathbf{u} . Такая ситуация реализуется в интерферометрах, регистрирующих нормальную компоненту перемещений, для которых

$$(\mathbf{n}, \mathbf{R}_0) = (\mathbf{n}, \mathbf{R}_1) = \cos \Theta; \quad \mathbf{u} = \omega \mathbf{n}, \quad (3)$$

где \mathbf{n} — нормаль к боковой поверхности объекта; ω — нормальная компонента перемещений. Подставляя соотношения (3) в выражения (1), (2), получаем после преобразований

$$\Phi = (4\pi/\lambda) \omega \cos \Theta; \quad \Delta\Phi = (2\pi/\lambda) \Delta\Theta \omega \sin \Theta + O(\Delta\Theta^2), \quad (4)$$

здесь $\Delta\Theta$ — изменение угла Θ при переходе в соседнюю точку голограммы (см. рис. 4). Полагая в (4) $\Delta\Theta \approx S/L$ (S — искомое расстояние между соседними участками голограммы, удаление которой от объекта равно L), получаем оценку диаметра голограммы

$$4S \approx (2\lambda L \Delta\Phi) / (\pi \omega \sin \Theta) + O(S^2/L^2). \quad (5)$$

В частности, для типичных значений: $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм, $L = 5 \cdot 10^2$ мм, $\omega = 10^{-2}$ мм, $\Delta\Phi \approx \pi/4$ — из (5) следует, что $4S \approx (12/\sin \Theta)$ мм.

Таким образом, для реализации расшифровки с использованием вариации чувствительности достаточно иметь голограммы небольших размеров. Например, при $\Theta = \pi/6$ размеры голограммы не превышают 30—40 мм, что обычно реализуется на практике.

ВЫВОДЫ

Представлены видоизменения основного алгоритма расшифровки [1, 2] для количественного анализа муаровых картин и интерферограмм, записанных методом усреднения во времени.

Для выделения главного максимума яркости на интерферограммах, записанных методом усреднения, совместно анализируются картины средин полос исходного поля яркости и его среднего уровня, который также восстанавливается при расшифровке. Однако особенность главного максимума не всегда целесообразно учитывать.

Принцип расшифровки интерферограммы на основе фазовых псевдосдвигов является достаточно универсальным и допускает разнообразные реализации псевдотрансформаций фазы: пространственные сдвиги, повороты и масштабные искажения поля яркости, вариации чувствительности интерферометра. Все это открывает широкие возможности для расшифровки интерферограмм, получаемых в классических интерферометрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришанов А. Н., Де С. Т., Ильиных С. П., Хандогин В. А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. I. Анализ и алгоритмы // Автометрия.— 1989.— № 1.
2. Де С. Т., Ильиных С. П., Хандогин В. А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. II. Реализация алгоритмов // Там же.
3. Гришанов А. Н., Де С. Т., Денежкин Е. Н., Хандогин В. А. Цифровая обработка голографических интерферограмм на основе муаровых эффектов // Автометрия.— 1986.— № 4.
4. Вест Ч. Голографическая интерферометрия.— М.: Мир, 1982.
5. Де С. Т., Денежкин Е. Н., Хандогин В. А. Применение муара интерференционных полос для обнаружения дефектов // Дефектоскопия.— 1984.— № 12.

Поступила в редакцию 27 сентября 1987 г.