

**РАСШИФРОВКА СПЕКЛОГРАММ  
МЕТОДОМ УПРАВЛЯЕМОГО ФАЗОВОГО СДВИГА**

Описан новый метод получения и расшифровки цифровых спеклограмм при измерении деформаций объекта. Метод основан на внесении управляемого фазового сдвига между интерферирующими пучками до и после деформации объекта и позволяет значительно снизить погрешность измерений.

Целью статьи является описание нового метода получения и расшифровки цифровых спеклограмм. Метод, основанный на внесении управляемого фазового сдвига между интерферирующими пучками до и после деформации объекта, позволяет значительно снизить погрешность измерений. Размер спеклов в пространстве изображения не зависит от статистических свойств рассеивающей поверхности, а зависит только от апертуры линзы, формирующей изображение [1]. При использовании объективов с числовой апертурой от 2 до 40 и источника освещения с длиной волны  $\lambda \approx 0,5$  мкм размеры спеклов меняются от 5 до 100 мкм. Для регистрации таких спекл-картин могут применяться телевизионные низкоразрешающие устройства ввода изображений.

Рассмотрим традиционный метод цифровой корреляционной спекл-интерферометрии. На рис. 1 показан интерферометр Майкельсона, отличающийся тем, что у него зеркальная опорная поверхность заменена на шероховатую. Деформация объекта изменяет фазы световых волн, рассеянных отдельными элементами его поверхности при регистрации в плоскости наблюдения  $(x, y)$ . Однако если смещение поверхности не слишком велико, то фазовые сдвиги этих волн можно считать одинаковыми.

Обозначим через  $\Psi(x, y)$  фазовый сдвиг в точке регистрации, вызванный деформацией объекта. Для интенсивности спекл-картины от деформированной поверхности имеем:

$$I_{\text{def}}(x, y) = (\bar{E}_s + \bar{E}_r)^2 = A_s^2 + A_r^2 + 2A_s A_r \cos(\varphi_s - \varphi_r + \Psi(x, y)), \quad (1)$$

где  $\bar{E}_s, \bar{E}_r$  – комплексные амплитуды опорной и объектной волн;  $A_s$  и  $A_r$  – амплитуды;  $\varphi_s - \varphi_r$  – разность фаз объектной и опорной волн в ситуации, когда деформация отсутствует.

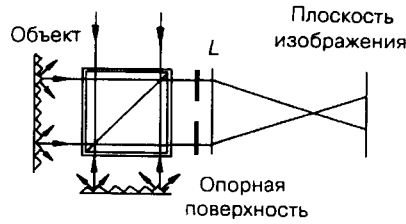


Рис. 1. Спекл-интерферометр с шероховатой опорной поверхностью

Корреляционное сравнение осуществляется вычитанием или сложением двух спеклограмм, одна из которых соответствует исходному  $I_{\text{ref}}(x, y)$ , а другая – деформированному  $I_{\text{def}}(x, y)$  состоянию поверхности объекта:

$$I_s(x, y) = |I_{\text{ref}}(x, y) - I_{\text{def}}(x, y)|. \quad (2)$$

Здесь  $I_{\text{ref}}(x, y)$  соответствует выражению (1) при  $\Psi(x, y) = 0$ . Подставляя в (2) выражения для  $I_{\text{ref}}(x, y)$  и  $I_{\text{def}}(x, y)$ , после элементарных преобразований получаем

$$I_s = N - N \cos(\Psi) = N(1 - \cos(\Psi)), \quad (3)$$

где  $N = 8A_s^2 A_r^2 \sin(\varphi_s - \varphi_r + \Psi(x, y)/2)$ .

Картина полос  $I_s$  модулируется спекл-структурой, возникающей в результате прохождения высокочастотных составляющих сигнала через оптическую систему с ограничивающей апертурой. Распределение яркости в картине корреляционных полос описывается выражением (3). Как видно, в тех областях плоскости изображения объекта, где вызванный деформацией фазовый сдвиг

$$\Psi = \pm 2k\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

выражение (3) равно нулю. Поэтому такие области при отображении будут выглядеть темными, тогда как в других, где это условие не выполняется, будут видны спеклы. На рис. 2 приведена типичная картина спекл-корре-

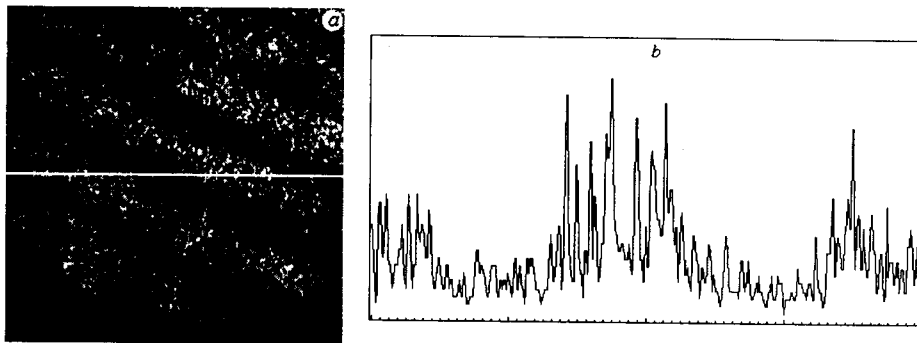


Рис. 2. Корреляционная спекл-интерферограмма (a) и распределение интенсивности по центральной строке (b)

ляционных полос, полученная при деформации плоской пластины с диффузной поверхностью.

Для расшифровки спекл-интерферограмм предлагается использовать калиброванные фазовые сдвиги при получении спеклограмм до и после деформации [2, 3]. Процедура предполагает выполнение ряда последовательных операций. Вначале регистрируют распределение интенсивности  $I_{\text{ref}}(\alpha)$  в спеклограмме недеформированной исходной поверхности объекта при внесении контролируемого фазового сдвига  $\alpha$  между предметным и опорным пучками. Затем регистрируют спеклограмму  $I_{\text{def}}(\beta)$  деформированной поверхности объекта при фазовом сдвиге  $\beta$ . Выражение (3) при этом можно представить в следующей форме:

$$I_{\text{ref}}(a) - I_{\text{def}}(b) = 4A_s A_r \sin(\varphi_s - \varphi_r + \Psi/2 + (\alpha + \beta)/2) \sin(\Psi/2 + (\beta - \alpha)/2). \quad (5)$$

Сигналы с низкочастотными составляющими углового спектра проходят через оптическую систему с ограничивающей апертурой без искажений, в то время как высокочастотные составляющие искажаются и формируют спекл-структуру. Если взять четыре спеклограммы, две из которых зарегистрированы до деформации объекта при фазовых сдвигах между предметным и опорным пучками 0 и  $\pi/2$ , а две другие – после деформации (при сдвигах  $\pi/2$  и  $\pi$ ), то можно определить фазовый сдвиг, вызванный деформацией поверхности объекта:

$$\text{tg}(\Psi/2) = \frac{|I_{\text{ref}}(\pi/2) - I_{\text{def}}(\pi/2)|}{|I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(\pi)|} = \frac{N \sin(\Psi/2)}{N \cos(\Psi/2)}. \quad (6)$$

В качестве примера представим значения  $I_{\text{ref}}$  и  $I_{\text{def}}$  в виде числовых массивов размером 512 точек. Фазовый сдвиг  $\Psi(x, y)$  зададим в виде линейной функции в диапазоне от 0 до  $4\pi$ . Для моделирования отражения от диффузно рассеивающей поверхности используем равномерно распределенные в диапазоне от 0 до  $2\pi$  случайные числа. Прохождение волнового фронта через ограничивающую апертуру представляем как фильтрацию в частотной области. После преобразования Фурье и подавления 200 высокочастотных гармоник выполним обратное преобразование. На рис. 3 показаны результаты расшифровки. Выражение (6) однозначно определяет не более половины фазового сдвига  $\Psi(x, y)$ , вызванного деформацией. Для определения

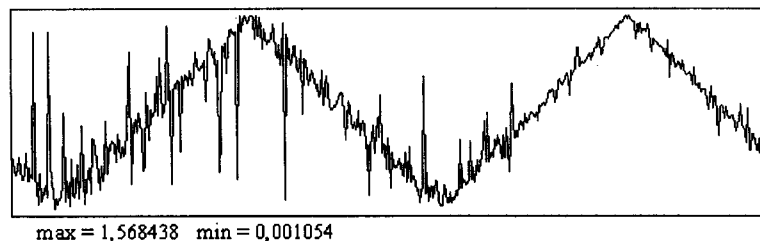


Рис. 3. Фазовые значения, определенные с помощью выражения (6), после прохождения волновых фронтов через вырезающую апертуру. Исходная фаза – пилообразная функция

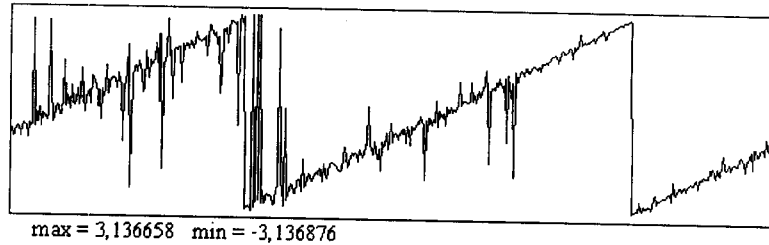


Рис. 4. Фазовые значения, определенные с помощью выражения (7), после прохождения волновых полей через вырезающую апертуру

полного фазового сдвига  $\Psi(x, y)$  в диапазоне от 0 до  $2\pi$  нами получена следующая формула:

$$\Psi(x, y) = \text{arctg} \frac{2K_1 K_2}{(K_2)^2 - (K_1)^2}, \quad (7)$$

где  $K_1 = I_{\text{ref}}(\pi/2) - I_{\text{def}}(\pi/2)$ ,  $K_2 = I_{\text{ref}}(0) - I_{\text{def}}(\pi)$ .

Выражение (7) требует регистрации четырех спеклограмм: двух до и двух после деформации объекта. При этом необходимо всего два фазовых сдвига. Схема регистрации спеклограмм следующая: сначала фиксируется спеклограмма исходного объекта; затем, после введения фазового сдвига  $\pi/2$ , регистрируется вторая, далее объект деформируется и фиксируется третья, а после внесения фазового сдвига  $\pi$  – четвертая спеклограмма. Анализ знаков числителя и знаменателя позволяет расширить область определения функции  $\text{arctg}$  в (7) от 0 до  $2\pi$ .

На рис. 4 показаны результаты расшифровки с применением алгоритма (7) при тех же исходных данных, что и на рис. 3. На графике видны точки, погрешность вычисления фазы в которых намного превосходит среднюю. Это происходит в точках, где видность  $V(x, y)$  меньше некоторого предела. Для алгоритма (7) она определяется выражением

$$V(x, y) = 1/I_0 \sqrt{(2K_2 K_3)^2 + ((K_2)^2 - (K_3)^2)^2}. \quad (8)$$

Точки, в которых видность меньше некоторой заданной величины, отбрасывались. Величина предела выбиралась такой, чтобы отсекалось не более 5 % всего количества точек. На рис. 5 показан результирующий график фазовых значений.

Предложенный метод расшифровки отличается от корреляционного тем, что не производится пространственное сравнение спеклов. Его можно рассматривать как интерференционный способ с ограничением спектра сигнала в частотной области.

В традиционных методах расшифровки требуется, чтобы спеклы имели достаточно большие размеры. При этом следует применять линзы с очень малой апертурой. Однако при уменьшении апертуры соответственно уменьшается и световой поток, проходящий через линзу. При некотором пороге не хватает чувствительности серийных видеосистем, используемых для регистрации. В ряде случаев приходилось применять фотоэлектронные умножители для усиления светового потока или другие устройства регист-

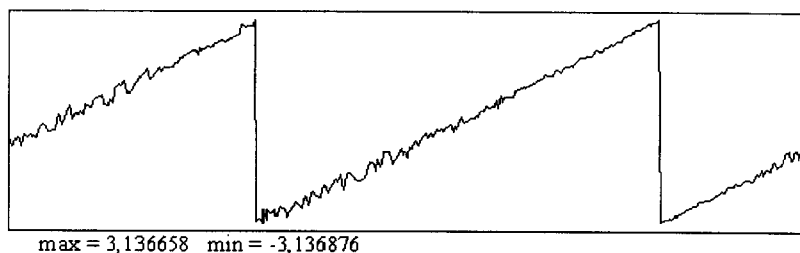


Рис. 5. Фазовые значения после удаления 5 % точек с низкой видимостью

рации с повышенной чувствительностью. Оптимальное рекомендуемое значение числовой апертуры для получения корреляционных спекл-интерферограмм  $\sim 8$ , тогда как в предложенном нами методе размер числовой апертуры может быть менее двух и на одну элементарную площадку датчика приходится несколько спеклов. В этом случае увеличивается световой поток, что позволяет применять обычные фотоприемники. При усреднении необходимо, чтобы на один элемент фотодетектора приходилось несколько спеклов, а оптическая система обеспечивала такое разрешение.

На рис. 6 показан график максимальных отклонений фазовых значений от действительных при пространственном усреднении четырех соседних точек. Это отражает ситуацию, когда на один элемент детектора попадают четыре спекла. Максимальная ошибка в этом случае составляет 1,5 %, а погрешность измерений фазового сдвига  $\approx \lambda/60 - \lambda/70$ .

При получении выражений для расшифровки предполагалось, что  $A_x, A_y$  и  $\varphi_x - \varphi_y$  не меняются после деформации объекта. Если же они меняются, то погрешность при определении фазовых значений увеличивается. Этот эффект называется декорреляцией спеклов. Выбирая схему интерферометра таким образом, чтобы декорреляция спеклов была минимальной, можно добиться максимальной чувствительности к выбранному виду деформаций. На практике некоторая декорреляция присутствует. Это приводит к увеличению погрешности. Экспериментальная проверка показала, что точность измерений перемещений точек поверхности при деформации объекта составила  $\lambda/20 - \lambda/30$ .

В предложенном методе получения и расшифровки спекл-интерферограмм используются особенности процесса формирования спекл-картин. Метод отличается от известных тем, что при определении поля фаз не проводится корреляционное сравнение спеклограмм. Анализ выполняется в

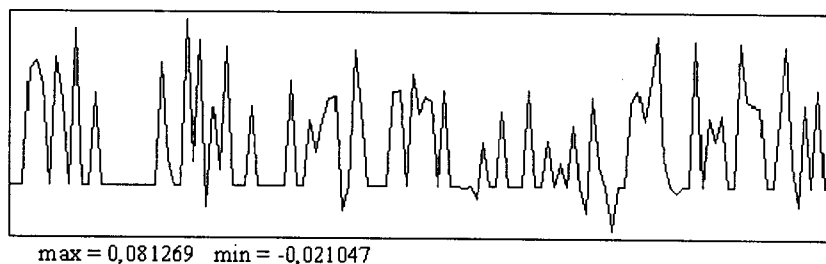


Рис. 6. Максимальные отклонения фазовых значений

каждой отдельно выбранной точке фотоприемника, поэтому метод по своей сути является локальным. Кроме того, полоса углового спектра оптического сигнала ограничивается низкочастотной областью. Предложенный метод можно использовать при измерении разности волновых фронтов, отраженных от диффузных поверхностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986.
2. Гужов В. И., Козачок А. Г., Нечаев В. Г. Измерение деформаций диффузных поверхностей методом цифровой спекл-интерферометрии // Опт. журн. 1996. № 10. С. 73.
3. Gushov V. I., Nechaev V. G. In-plane deformation measurement by digital phase-shifting speckle-interferometry // Proc. SPIE. 1996. 2791. P. 165.

*Поступила в редакцию 21 сентября 1998 г.*

---

---

---

**Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!**