

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОГРАММ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ИНТЕРФЕРИРУЮЩИМИ ЛУЧАМИ

© 2005 г. О. Т. Олейник, канд. техн. наук; Т. И. Вороняк, канд. техн. наук; Г. И. Гаськевич

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, Львов, Украина

E-mail: dep24@ah.ipm.lviv.ua

Предложен способ и методика контроля сдвига фаз между интерферирующими лучами с помощью спекл-интерферограмм. Такой контроль позволяет исключить операции калибровки фазосдвигающего элемента и контроля стабильности мощности лазерного излучения в процессе спекл-интерферометрических исследований.

Коды OCIS: 120.6160, 120.4290, 100.2000.

Поступила в редакцию 25.11.2004.

Введение

О преимуществах спекл-интерферометрии как неразрушающего метода контроля состояния исследуемых поверхностей шла речь в работах [1, 2] и др. В работе [3] приведены оптические схемы спекл-интерферометров и результаты экспериментальных исследований продольных и поперечных деформаций балочных образцов конструкционных материалов. Тем не менее, эти результаты позволяют получить лишь качественную картину полей деформаций исследуемых поверхностей. Для количественной оценки полей перемещений и деформаций необходимо применять так называемые фазосдвигающие алгоритмы для обработки спекл-интерферограмм (СИ) [4, 5]. Но при этом возникают соответствующие требования и к самим СИ. Для того чтобы можно было применить фазосдвигающие алгоритмы, необходимо регистрировать несколько СИ как в начальном, так и в нагруженном состоянии, отличающихся одна от другой лишь углом изменения (сдвига) фазы одного из двух световых лучей, которые интерферируют между собой в плоскости или пространстве исследуемого объекта [4, 5]. Сдвиг фазы (СФ) в одном из лучей можно реализовать путем перемещения (сдвига), например, поворотного зеркала в оптической схеме интерферометра [2]. Для этого его крепят к пьезоэлектрическому элементу, которым может быть пластина кристаллического кварца или пьезокерамики. Но при этом возникают проблемы обеспечения необходимого СФ с определенной погрешностью, ведь при большой погрешности СФ применение фазосдвигающих алгоритмов для СИ не даст ожидаемого результата. Для постоянного контроля СФ в оптическую схему интерферометра необходимо ввести дополнительные элементы, которые значительно усложняют ее и сделают менее стабильной во времени. На рис. 1 показана оптическая схема интерферометра Линдерца, в которой постоянный контроль СФ можно осуществлять с помощью оптических клиньев 2, 9, 10 и фотопри-

емников 3, 11. В этой схеме оптический клин 2 и фотоприемник 3 служат для контроля стабильности мощности лазерного излучения, а клинья 9, 10 и фотоприемник 11 – для контроля СФ.

Абсолютная погрешность СФ не должна превышать 1° , что соответствует относительной погрешности $\sim 1/360$ (0,3%). Достичь такой точности калибрования или контроля СФ и интенсивности светового потока в аналоговых оптико-электронных системах практически невозможно. Поэтому предлагается способ и методика ввода и контроля СФ, а также компенсации нестабильности интенсивности светового потока лазера при регистрации СИ, основанные на использовании в качестве индикаторов самих зарегистрированных СИ. Благодаря использованию такого способа контроля упрощаются система наблюдений и процедура регистрации СИ и исключаются трудоемкие операции калибровки фазосдвигающего элемента (ФСЭ) и контроля интенсивности лазерного светового потока.

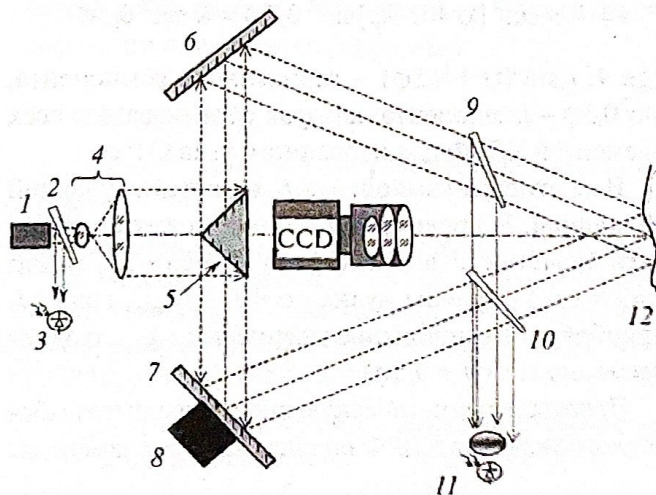


Рис. 1. Оптическая схема спекл-интерферометра для реализации фазосдвигающих методов исследования состояния поверхности. 1 – лазер; 2, 9, 10 – оптические клинья; 3, 11 – измерительные фотоприемники; 4 – расширитель луча; 5 – призма; 6, 7 – зеркала; 8 – фазосдвигающий элемент; 12 – исследуемая поверхность, CCD – ПЗС-видеокамера.

Способ контроля. Если использовать в качестве индикатора значений различных фаз и интенсивности светового потока СИ, регистрируемую с относительной погрешностью квантования 0,2%, то необходимая точность СФ может быть обеспечена обычным интерактивным подбором управляющего напряжения на ФСЭ, а контроль вариации интенсивности светового потока – путем ввода корректирующих коэффициентов к любой СИ. Рассмотрим теоретические основы такого методического подхода.

В произвольной точке плоскости регистрации изображений или СИ интенсивности сигналов S_1 , S_2 , которые зарегистрированы соответственно до и после СФ одного из световых лучей, определяются соотношениями [1]

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= i_1 + i_2 + 2\sqrt{i_1 i_2} \cos \psi, \\ S_2 &= i_1 + i_2 + 2\sqrt{i_1 i_2} \cos(\psi + \varphi), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ψ – существующая в точке регистрации разность фаз между когерентными световыми пучками с интенсивностями соответственно i_1 , i_2 ; φ – введенный СФ между лучами.

Разность интенсивностей двух СИ (двух двумерных изображений), которые зарегистрированы с помощью цифровых средств [2], является матрицей разностных значений R , которые функционально связаны с углом СФ φ . Поэлементное возведение в квадрат разностной матрицы дает квадратично детектированную разностную матрицу (в дальнейшем КДРМ), отдельно взятый элемент которой имеет значение

$$\begin{aligned} R^2 &= (S_1 - S_2)^2 = \\ &= 4i_1 i_2 \sin^2(\psi + 0,5\varphi) \sin^2 0,5\varphi = K \sin^2 0,5\varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

где $4i_1 i_2 \sin^2(\psi + 0,5\varphi)$ – вариативная компонента, $\sin^2 0,5\varphi$ – компонента, которая одинакова для всех элементов КДРФ для избранного угла СФ φ .

Вариативная компонента K является случайной величиной. В пределах КДРФ она может приобретать значение в диапазоне от 0, если $i_1 i_2$ и/или $\sin^2(\psi + 0,5\varphi)$ равны нулю, до $4(i_1 - i_2)_{\max}$, если $i_1 i_2$ приобретают наибольшие значения $(i_1 i_2)_{\max}$, и одновременно $\sin^2(\psi + 0,5\varphi) = 1$.

Проведем статистическую оценку среднего выборочного значения КДРФ по ансамблю ее элементов.

$$R^2 = \langle K \rangle \sin^2 0,5\varphi. \quad (3)$$

Согласно статистическому “правилу трех сигм” (“правило 3σ ”) выборочное среднее значение K для одного элемента имеет наибольшую возможную вариацию $0,66(i_1 i_2)_{\max}$, соразмерную с математическим ожиданием $M(K)$ [3]. Среднее выборочное значение K , взятое по выборке из n элементов, име-

ет в $\sqrt{n}$ раз меньшую вариацию, т. е. $\langle K \rangle_n = M(K) \pm \pm 0,66n^{-0,5}(i_1 i_2)_{\max}$. Для выборки из 16384 элементов $\langle K \rangle_{16384} = M(K) \pm 0,005(i_1 i_2)_{\max}$, т. е. выборочное среднее приближается к математическому ожиданию с погрешностью, которая меньше половины уровня квантования (при 8-битовом квантовании на 256 уровней).

Для большого ансамбля элементов (а их в КДРФ сотни тысяч) среднее значение вариативной компоненты K практически равняется математическому ожиданию и не зависит от изменения поэлементных случайных значений компонент ψ , φ и $i_1 i_2$. Среднее значение K определяется лишь интегральной интенсивностью и распределением светового потока, которые предполагаются постоянными на протяжении времени проведения эксперимента при определении фазового сдвига. Если на протяжении этого времени интегральная интенсивность $\langle S \rangle$ от одной СИ к другой изменяется из-за нестабильности мощности лазерного источника излучения, то она может быть скомпенсирована введением в любую СИ коэффициента P нестабильности интенсивности, например во вторую СИ относительно принятой за базовую первой СИ: $P_2 = S_1 / S_2$.

Исходя из неизменности $\langle K \rangle$ вычислим его значения, используя дополнительную спекл-интерферограмму S_{3M} , зарегистрированную при условии получения максимального среднего значения $R^2_{\max}$. Согласно (3) максимальное среднее значение $R^2_{\max}$ соответствует углам $\varphi = (2n + 1)\pi/2$, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, а главное максимальное среднее значение $R^2_{\max}$ отвечает углу СФ $\varphi = \pi$. Для этого угла $\langle K \rangle = R^2_{\max}$.

Подставив полученное значение $\langle K \rangle$ в уравнения (3), запишем выражения для определения “главных” (4) и “неглавных” значений (5) углов СФ φ :

$$\varphi = \pm 2 \arcsin \sqrt{\langle R^2 \rangle / \langle R^2 \rangle_{\max}} \quad \text{при } \varphi \in [-\pi, \pi], \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= 2\pi - 2 \arcsin \sqrt{\langle R^2 \rangle / \langle R^2 \rangle_{\max}} \quad \text{при } \varphi \in [\pi, 2\pi] \\ \varphi &= -2\pi + 2 \arcsin \sqrt{\langle R^2 \rangle / \langle R^2 \rangle_{\max}} \quad \text{при } \varphi \in [-\pi, -2\pi] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

На рис. 2 сплошной линией изображен график зависимости (4) для главных значений углов СФ. Неглавные значения углов СФ (5) в диапазонах $[\pi, 2\pi]$, $[-\pi, -2\pi]$ изображены штриховыми линиями.

Процедуру детектирования разностной матрицы R можно выполнять также путем линейного детектирования:

$$\begin{aligned} |R| &= |S_1 - S_2| = \\ &= \left| 2\sqrt{i_1 i_2} \sin(\psi + 0,5\varphi) \sin 0,5\varphi \right| = |K| \sin 0,5\varphi. \end{aligned} \quad (6)$$

Все предположения относительно средних значений $|R|$ линейно детектированных сигналов совпа-

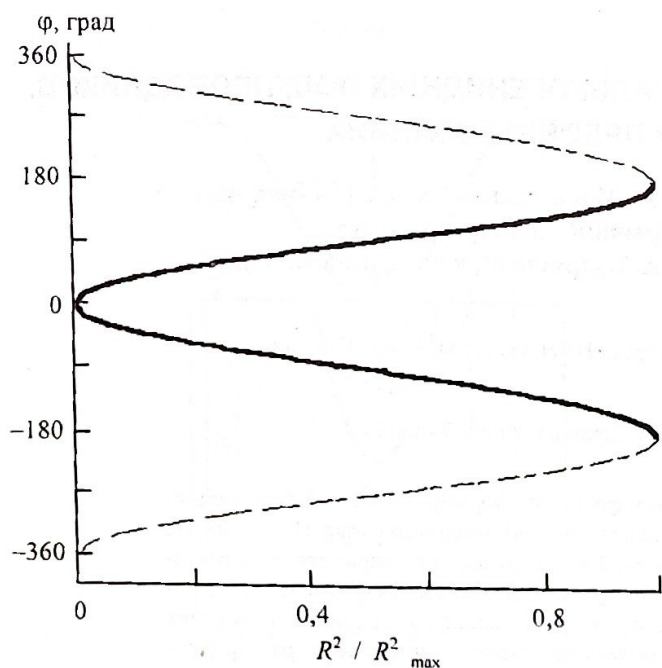


Рис. 2. Связь между углом СФ и отношением средних значений двух КДРФ.

дают с предположениями, приведенными выше, для средних значений R^2 . Максимальное среднее значение $|R|_{\max}$ также соответствует углам СФ $\varphi = (2n + 1)\pi/2$, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. С учетом вышесказанного выражение для определения главных значений угла СФ при линейном детектировании будет иметь вид

$$\varphi = \pm 2 \arcsin \left(\frac{|R|}{|R|_{\max}} \right). \quad (7)$$

График уравнения (7) для главных и неглавных значений углов СФ имеет такой же вид, как и график, который показан на рис. 2.

Процедуры квадратичного детектирования и усреднения можно выполнять как в оптических системах с использованием аналоговых СИ [1], так и на вычислительных машинах с использованием цифровых СИ. При цифровой реализации более технологично вместо квадратичного детектирования R^2 применять линейное детектирование $|R|$, поскольку в этом случае нет необходимости выполнять операцию поэлементного возведения в квадрат разностной матрицы R .

Методика контроля. Соотношения (4), (5), (7) служат основой для определения углов СФ между интерферирующими пучками. Методика такого определения с привлечением линейного детектирования (6) состоит из следующих процедур:

регистрируем начальную СИ S_1 при минимальном значении сигнала управления на ФСЭ;

постепенно увеличивая сигнал управления на ФСЭ методом последовательного итеративного подбора в зоне угла СФ $\varphi = 180^\circ$, регистрируем несколько текущих СИ; предварительно откорректировав интенсивность, вводим их в программу расчета

$|R|$, находим и регистрируем максимальное значение $|R|_{\max}$; текущие СИ ликвидируем;

регистрируем в окрестности необходимого угла СФ текущие фазосдвинутые СИ, корректируем их интенсивность и рассчитываем текущие значения $|R|$; на основе полученных $|R|$ и известного $|R|_{\max}$ с помощью уравнения (7) рассчитываем и анализируем значения углов СФ текущих СИ;

отбираем и сохраняем для дальнейшего использования фазосдвинутую СИ S_2 , которая соответствует необходимому углу СФ; другие текущие СИ ликвидируем.

Следует заметить, что вышеприведенные процедуры можно автоматизировать. Для автоматизированного ввода СФ необходимо разработать и реализовать схему управления ФСЭ от компьютера, реализовать возможность автоматической регистрации СИ и расчета среднего продетектированных разностных матриц или их фрагментов. Входными данными для системы автоматического ввода СФ должны быть данные о погрешности итераций, данные об угле СФ, данные об окне выборки.

Заключение

Предложен способ и методика ввода и контроля СФ, а также компенсации нестабильности интенсивности лазерного излучения при регистрации спекл-интерферограмм. Способ основан на использовании в качестве индикаторов зарегистрированных спекл-интерферограмм и позволяет исключить трудоемкие операции калибровки ФСЭ и контроля интенсивности лазерного светового потока. Благодаря использованию предложенной методики упрощаются система наблюдений и процедура регистрации спекл-интерферограмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 328 с.
2. Муравский Л.И., Вороняк Т.И., Смоляк В.И., Тхорук А.Л. Исследование поверхностных деформаций металлических балочных образцов методами электронной спекл-интерферометрии // Отбор и обработка информации. 2002. № 17. С. 131–135.
3. Пустыльник Э.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. 288 с.
4. Kim S.-W., Kang M.-G., Han G.-S. Accelerated phase-measuring algorithm of least squares for phase-shifting interferometry // Opt. Engin. 1997. V. 36. № 11. P. 3101–3105.
5. Ruiz P.D., Huntley J.M., Shen Y. et al. Phase errors in low-frequency vibration measurement with high-speed phase-shifting speckle pattern interferometry // Opt. Engin. 2001. V. 40. № 9. P. 1984–1992.