

УДК 535.417 : 531.717.2

И. П. Гуров

(Санкт-Петербург)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ

Показаны особенности метода автоматической высокоточной регистрации положений интерференционных экстремумов при обработке интерферограмм с несинусоидальной информативной составляющей. Представлена модель, адекватная реальному процессу оптического контроля.

При проведении высокоточного оптического контроля, как известно, широко используется интерферометрический метод [1, 2]. В производственных условиях автоматическая обработка «живой» интерференционной картины осуществляется в интерферометрах известной серии Mark фирмы ZYGO [3] и в отечественном приборе ИКД-110 [4]. Результирующая погрешность контроля составляет примерно $\lambda/20$ (λ — длина волны излучения). Требуемая точность операций контроля в условиях возрастающих потребностей применения прецизионных деталей и узлов в современном приборостроении характеризуется значениями допустимой погрешности $\lambda/100$ и менее.

Задача высокоточного интерферометрического контроля решается на основе использования метода фотографической регистрации интерферограмм с последующим точным определением положений интерференционных экстремумов с помощью измерительного микроскопа [1]. Однако такой метод является трудоемким. Результаты измерений включают субъективные ошибки оператора. Повышение производительности при дополнительном повышении точности регистрации положений интерференционных экстремумов достигается в рассматриваемом далее методе автоматического анализа параллельных сечений интерферограммы.

При высокоточном контроле анализируются интерферограммы, характер которых априорно известен. В интерферометрах сдвига интерферограммы часто имеют вид, представленный на рис. 1. Задача состоит в нахождении координат экстремумов x_{ij} в сечениях y_j .

Получаемые данные $\xi_j(X, y_j, \theta)$ в N -сечениях в общем случае следует рассматривать как реализацию N -канального интерферометрического процесса с вектором параметров θ . При этом вследствие статического характера изображения допустимо получение отдельных реализаций ξ_j с разделением во времени. Иными словами, на практике задача сводится к одномерной

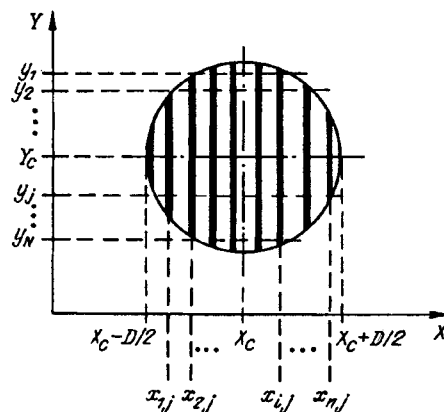


Рис. 1. Интерферограмма с эквидистантным расположением полос

обработке данных в сечениях y , при последовательном переходе от сечения к сечению.

Модель реального векторного интерференционного сигнала имеет вид

$$\xi(X, Y, \theta) = \mu(X, Y)s(X, Y, \theta) + p(X, Y), \quad (1)$$

где $s(\cdot)$ — априорная модель сигнала (вектор-столбец размерностью N); $p(\cdot)$ — аддитивная помеха;

$$\mu(X, Y) = \begin{cases} \mu_j(X, y_j), & (X, y_j) \in \text{circ}[(X - X_c)/D, (Y - Y_c)/D]; \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (2)$$

— диагональная (размерностью $N \times N$) матрица функций. Выражение (2) справедливо для интерферограмм с рабочим полем в форме круга с центром (X_c, Y_c) (см. рис. 1), которые получают при реальных условиях освещения и регистрации, характеризуемых априорно неизвестными функциями $\mu_j(\cdot)$. Согласно (1), необходимо использовать помехоустойчивые методы обработки, не вносящие жестких ограничений на конкретный вид отдельной реализации фотоэлектрического сигнала.

Подходящим методом является восстановление фазы аналитического сигнала [2]. Операции восстановления фазы в двухлучевой интерферограмме на основе компьютерного алгоритма быстрого преобразования Фурье рассмотрены в [5]. В [6] исследованы возможности высокоточного определения фазы интерференционного сигнала.

Рис. 2 иллюстрирует процесс восстановления фазы для реализации сигнала в сечении типичной интерферограммы, полученной методом фотографирования с увеличенной экспозицией. На рис. 2 $Z(X, \theta)$ обозначает описание j -й реализации комплексного сигнала:

$$Z(X, \theta) = A_0(X) + 2 \sum_{k=1, 2, \dots} A_k(X) \exp(ik\varepsilon) \exp(i2\pi k u X). \quad (3)$$

В этой формуле вектор параметров $\theta = (A_0, \dots, A_k, \dots, \varepsilon; u)^T$. Действительная и мнимая части этого сигнала:

$$\text{Re}Z(X, \theta) \approx s_c(X, \theta') = A \cos[2\pi u X + \varphi(X)], \quad (4)$$

$$\text{Im}Z(X, \theta) \approx s_s(X, \theta') = A \sin[2\pi u X + \varphi(X)]. \quad (5)$$

Здесь $\theta' = G\theta = (A, u, \theta_\varphi)^T$, G — нелинейный оператор. В (3) параметр ε характеризует начальный фазовый сдвиг полос в интерферограмме относительно ее центра; u обозначает пространственную частоту полос.

Из (4) и (5) фаза определяется как

$$\hat{\Phi}(X, u, \theta_\varphi) = \text{arctg}[s_s(X, \theta')/s_c(X, \theta')]. \quad (6)$$

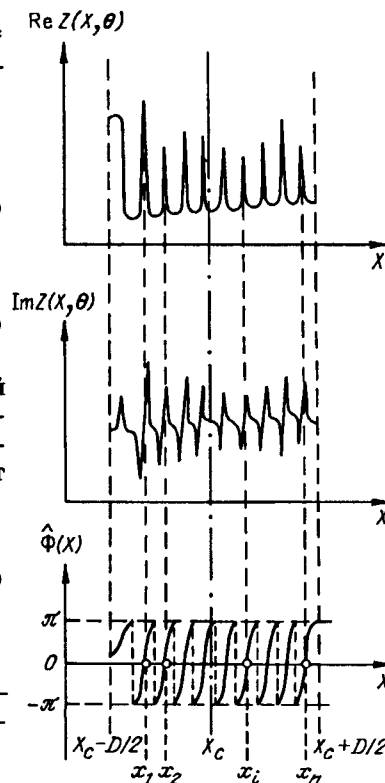


Рис. 2. Определение координат интерференционных экстремумов по положению корней фазовой функции

**Значения координат экстремумов
в четырех типичных сериях измерений
реальной интерферограммы**

| Серия измерений | x_j , эл. | $\frac{ \Delta X }{\sigma/2\pi}$, эл. |
|-----------------|--|--|
| 1 | 5,25; 34,45; 98,45; 185,57; 263,03; 344,52; 429,20; 517,87; 606,21; 692,28; 776,97; 860,33; 943,64 | — |
| 2 | — 34,14; 98,40; 185,44; 262,91; 344,39; 428,81; 517,85; 606,22; 692,11; 776,84; 860,27; 943,56 | $\frac{0,14}{0,05}$ |
| 3 | — 34,10; 98,32; 185,35; 262,75; 344,25; 428,60; 517,69; 605,71; 691,88; 776,70; 860,29; 943,43 | $\frac{0,15}{0,13}$ |
| 4 | — 34,17; 98,37; 185,41; 262,80; 344,19; 428,67; 517,69; 605,90; 691,83; 776,81; 860,19; 943,56 | $\frac{0,14}{0,06}$ |

Из рис. 2 видно, что в окрестности корней x_i фазовой функции (6), соответствующих экстремумам исходного сигнала, обеспечивается выполнение условия $(1/2\pi) \times (\partial\Phi/\partial X) > u$, т. е. существенно более высокая крутизна преобразования по сравнению с сигналом синусоидальной формы с частотой u .

Чувствительность метода проверялась с помощью пробных смещений интерферограммы (см. рис. 1) в направлении X на малую величину ΔX .

Средние квадратические отклонения σ зарегистрированных положений корней фазовой функции (6) относительно среднего смещения $\overline{\Delta X}$ от серии к серии измерений характеризуют погрешность метода $\delta\epsilon/2\pi \approx u\sigma/2\pi$. Полученные данные приведены в таблице. Число элементов дискретизации в сечении интерферограммы составляло $n = 1024$. Заметим, что значение x_1 в исходной серии измерений 1, обусловленное краевым эффектом на границе рабочего поля интерферограммы, отброшено при совместном анализе данных.

Из данных таблицы следует, что сходимость результатов измерений координат экстремумов интерференционного сигнала (см. рис. 2) характеризуется примерно 0,1 шага дискретизации, что соответствует для обрабатываемого интерференционного сигнала ($u \approx 0,012$ эл.⁻¹) малой относительной погрешности, равной $u\sigma/2\pi = \sigma(2\pi B)^{-1} \approx 10^{-3}$ шага полос B .

Таким образом, показано, что применение описания составляющих (4), (5) сигнала (3) расширяет область применения помехоустойчивого метода [5, 6] для решения задач высокоточного нахождения положений экстремумов сигналов, вид которых приведен на рис. 2, включая семейство сигналов многолучевой интерференции.

Учитывая результаты работы [7], можно сделать вывод, что метод восстановления фазы аналитического сигнала является малочувствительным не только к влиянию фоновой составляющей и неравномерности освещения, но также (в широких пределах в приближении (4), (5)) к виду распределения интенсивности и изменению шага интерференционных полос. Погрешность интерферометрического контроля в автоматическом режиме в реальных условиях измерений составляет не более $\lambda/100$. Полученные результаты подтверждают адекватность общей модели (1) основным классам реальных интерференционных сигналов в автоматизированных системах высокоточного оптического контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптический производственный контроль /Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
3. Koliopoulos C. L. Fringe analysis of interferograms // Laser Optronics. 1988. 7, N 5. P. 65.
4. Агурок И. П., Горелик М. С., Духопел И. И. и др. Универсальный интерферометр ИКД-110 // ОМП. 1990. № 11.
5. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry // JOSA. 1982. 72, N 1. P. 156.
6. Гуров И. П. Помехоустойчивый фотоэлектрический метод измерения фазовых характеристик интерференционной картины // Метрология. 1986. № 7.
7. Гуров И. П., Павлова А. Б. Определение положения отражающей поверхности второго порядка методом машинной обработки интерференционной картины // Автометрия. 1990. № 3.

Поступила в редакцию 10 января 1994 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!