

($a - E_m = 0,572958, E_{sk} = 0,286479, D_m = 0,1, D_{sk} = 0,05, N = 3, N_c = 50, \varphi_{sk} = [1,795467, 3,310908]$; $b - E_m = 0,572958, E_{sk} = 0,286479, D_m = 0,1, D_{sk} = 0,05, N = 4, N_c = 50, \varphi_{sk} = [1,608234, 2,557616]$), в квадратных скобках указаны границы изменения $S_{\Delta\varphi}$, т. е. $S_{\Delta\varphi_{\min}}$ и $S_{\Delta\varphi_{\max}}$.

Из графиков видно, что погрешность измерения фазы от неточности измерения яркости в реальных ситуациях значительно выше, чем от неточности задания фазового сдвига. На рис. 3 показано влияние числа N фазовых сдвигов на погрешность измерения фазы. При увеличении N погрешность уменьшается очень медленно, поэтому целесообразность использования для повышения точности многоточечного алгоритма должна обсуждаться в каждом конкретном случае.

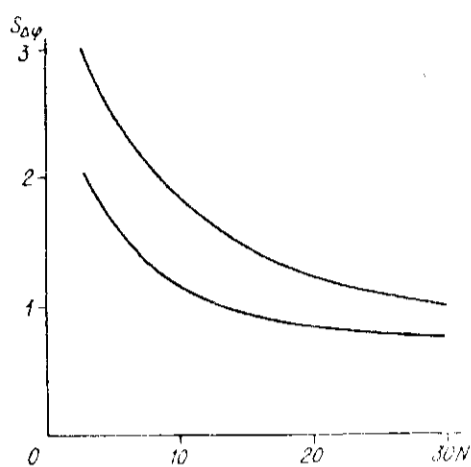


Рис. 3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brunning J. H., Gallager J. E., Rosenfeld D. P. et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses // Appl. Opt.—1974.—13.—P. 2693.
2. Schwider J., Burov R., Elssner K.-E. et al. Digital wavefront measuring interferometry: some systematic error sources // Appl. Opt.—1983.—22.—P. 3421.
3. Cheng Y.-Y., Wyant J. C. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry // Appl. Opt.—1985.—24.—P. 3049.
4. Hariharan P., Oreb B. F., Eiju T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error compensating phase calculation algorithm // Appl. Opt.—1987.—26.—P. 2504.

Поступила в редакцию 21 сентября 1992 г.

УДК 621.378.9

В. И. Гужов, А. Е. Подъяков, Ю. Н. Солудкин, З. И. Штейнгольц
(Новосибирск)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Описана производственная система для анализа плоских оптических поверхностей, основанная на одномерном преобразовании Фурье. Рассмотрены условия, при которых поле разности фаз восстанавливается с точностью до знака. Исследованы точностные характеристики системы.

Получение информации о фазе волнового фронта по интерференционной картине может быть выполнено с помощью различных методик и технических средств. Проведенный анализ и экспериментальные исследования показали, что применение методики, основанной на одномерном преобразовании Фурье, позволяет строить системы восстановления фазы, отличающиеся простотой технической реализации и высоким уровнем автоматизации эксперимента, и получать необходимые точностные характеристики.

Для контроля формы поверхности плоских оптических деталей была разработана оптико-электронная система. Структурная схема системы представ-

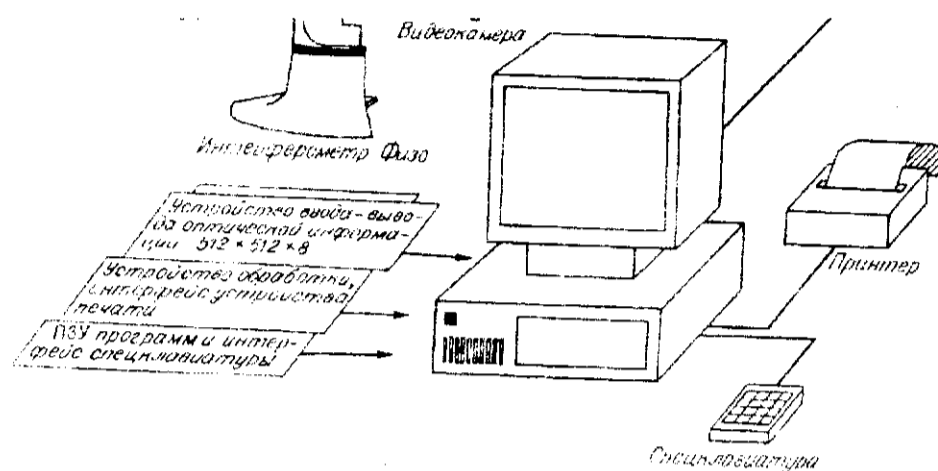


Рис. 1

лена на рис. 1. Основу оптической части составил интерферометр Физо. Интерферограммы оцифровывались и вводились в компьютер с помощью устройства ввода оптических изображений на основе телевизионной камеры.

На рис. 2 представлена интерферограмма, полученная при контроле одного из изделий. Значения интенсивности по полю интерферограммы описываются выражением

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos(2\pi f_0 x + \varphi(x, y)), \quad (1)$$

где $i(x, y)$ — освещенность в точке; $a(x, y)$ и $b(x, y)$ отражает неравномерность освещенности по полю интерферограммы; $\varphi(x, y)$ — локальная фаза.

Выделение информации о фазе $\varphi(x, y)$ волнового фронта и форме поверхности исследуемого объекта основано на методике, изложенной в [1]. Ее основу составляет сдвиг в частотной области действительной части фурье-образа сигнала. Для получения искомой информации [1] представим $c(x, y)$ в комплексной форме с помощью подстановки

$$c(x, y) = (1/2)b(x, y)\exp[i\varphi(x, y)]. \quad (2)$$

$$i(x, y) = a(x, y) + c(x, y)\exp(2\pi j f_0 x) + c^*(x, y)\exp(-2\pi j f_0 x). \quad (3)$$

Преобразование Фурье (3) в направлении x описывается выражением

$$I(x, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(-f - f_0, y), \quad (4)$$

где $I(x, y)$, $A(f, y)$, $B(x, y)$ — фурье-образы соответствующих величин; f — пространственная частота в направлении x .

На рис. 3 представлен спектр одной из строк интерферограммы. Данный случай характеризуется разделением спектральных составляющих, что является важнейшим условием получения достоверных результатов.

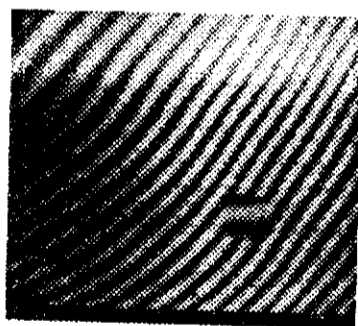


Рис. 2

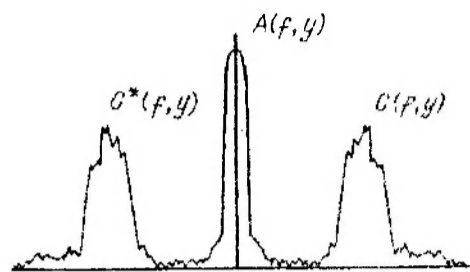


Рис. 3

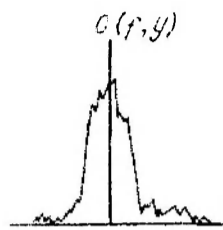


Рис. 4

Следующим шагом является выделение составляющей $C(f - f_0)$ с помощью операций фильтрации и сдвига. Результат преобразований представлен на рис. 4. На этом шаге исключается составляющая $A(f, y)$, представляющая неравномерность освещенности по полю интерферограммы.

Обратное преобразование Фурье значений $C(f, y)$ и последующее логарифмирование позволяют получить искомую фазу в виде

$$\log |c(x, y)| = \log |(1/2)b(x, y)| + \varphi(x, y). \quad (5)$$

На этом шаге исключается мультипликативная составляющая неравномерности освещенности по полю интерферограммы, представленная $b(x, y)$.

Для полного восстановления волнового фронта необходимо удалить 2π -периодичность, содержащуюся в строке, повторить описанную процедуру для всех значений y и добавить результат выделения фазы в направлении y при $x = x_0$.

При реализации системы выявились некоторые важные особенности применения изложенной выше методики.

При определенных условиях формирования интерференционной картины возможно получение полной информации о фазе волнового фронта с учетом ее знака. Это возможно, если соотношение пространственной несущей f_0 и информационной составляющей f таково, что происходит разделение спектральных составляющих сигнала. Необходимо также иметь априорную информацию об ориентации в пространстве опорного волнового фронта при формировании интерференционной картины.

Наиболее важным при обработке интерферограмм, особенно при целочисленном представлении данных, является решение вопроса о значении сдвига в частотной области и его влиянии на результат. Сдвигу в частотной области соответствует следующая операция в пространственной области для каждой строки интерферограммы:

$$\varphi(x, y) = \varphi(x, y) - kx. \quad (6)$$

Для получения двумерного волнового фронта необходимо, чтобы сдвиг в каждой строке был одинаковым. Его значение должно быть таким, чтобы результат имел максимальное количество информационных разрядов и из него были исключены линейные составляющие.

Для исследования возможностей методики был создан пакет программ, состоящий из программ синтеза интерферограмм, программ восстановления волнового фронта, графического пакета, осуществляющего сравнение исходных и восстановленных данных, а также программ, обеспечивающих их отображение. На первом этапе моделирования рассматривались неискаженные интерферограммы разного разрешения и оценивалось влияние эффекта Гиббса на результат. Ошибка для краевых 10% точек превышала на несколько порядков ошибки в остальных точках. Решить задачу минимизации ошибки позволило исключение из рассмотрения краевых точек. Это можно сделать при контроле оптических деталей, поскольку краевые области этих деталей скры-

является механической оправкой. Далее проводилось моделирование процесса десцифровки искаженных различными шумами интерферограмм. Было определено необходимое разрешение интерферограмм для получения требуемых точностных и динамических характеристик. Для случая 128×128 точек при исключении шести краевых точек методическая погрешность в точке составила $\lambda/50$ при диапазоне изменения фазы от $\lambda/30$ до 6λ и среднеквадратическое отклонение исходного поля фаз от восстановленного — $\lambda/100$.

Основной целью при разработке программного обеспечения являлось достижение высокого быстродействия и минимизация объема программы. Все вычислительные операции выполняются в целых числах, применен оригинальный алгоритм преобразования Фурье, позволяющий определять группу пространственных частот и производить вычисления только в целых числах ограниченной разрядности. Необходимые для вычислений математические функции заданы таблично. Все это в совокупности позволило сократить время обработки при разрешении 128×128 точек до 30 с, включая различные преобразования результатов для устройства отображения, и разместить программное обеспечение в ПЗУ.

Оценка погрешностей системы была проведена при контроле формы эталонных оптических деталей на интерферометре MARK 3 фирмы ZYGO (США). В результате абсолютная погрешность системы в точке составила $\lambda/25$ и среднеквадратическое отклонение — $\lambda/50$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // JOSA.—1982.—72.— P. 156.

Поступила в редакцию 23 сентября 1992 г.

УДК 535.411.01

В. И. Гужов, Ю. П. Солодкин

(Новосибирск)

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОЙ РАЗНОСТИ ФАЗ В ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ

Рассмотрено влияние погрешностей определения разностей фаз на восстановление полной фазы с помощью методики, основанной на решении системы сравнений целых чисел. Исследованы условия, при которых возможна корректная результата, предложены условия выбора исходных модулей.

Задачей интерферометрии является получение полной разности фаз световых волн по двумерной интерференционной картине или по периодическому изменению яркости в заданных точках. Причем разность фаз в интерферометрах определена с точностью до периода интерференционной полосы. Полная фаза может быть найдена только при априорных допущениях о плавности изменения фазы пространственным или временным анализом интерференционной картины. В этом случае полная фаза определяется подсчетом интерференционных полос. Автоматизация процесса выделения экстремальных значений интерференционной картины и определения полной фазы оказывается довольно сложной. Алгоритм включает в себя поиск непрерывных зон, в которых фаза плавно меняется в пределах периода, определение знака перехода по изменению фазы внутри зоны, устранение разрывов интерференционных полос, имеющих одинаковые значения, и определение полной фазы.