

УДК 53.082.54

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ БЕЛОГО СВЕТА

И. Н. ФИЛИППОВ, С. С. КУРАЧЕНКО

ОАО «Оптоэлектронные системы»

Минск, Республика Беларусь

UDC 53.082.54

DATA PROCESSING METHODS IN WHITE LIGHT SCANNING INTERFEROMETRY

I. N. FILIPAU, S. S. KURACHENKO

Аннотация

Описан общий принцип работы интерферометра белого света. Приводится обзор основных методов восстановления профиля поверхности по набору интерферограмм. Приводится их сравнительная характеристика. Производится моделирование набора интерференционных картин. Производится восстановление профиля поверхности по модельному набору интерференционных картин. Оцениваются погрешности рассмотренных методов, в зависимости от шумов различной природы.

Ключевые слова:

интерферометрия белого света, измерение профиля поверхности, нахождение пика интерферограммы.

Abstract

Described general principles of scanning white light interferometry. Common methods of profile estimation from white light interferograms have been reviewed. Comparison of these methods has been performed. Sequence of interferograms has been modeled. Surface profile has been restored from modeled interferograms using every described method. Dependency of restoration error from different errors in raw data has been analyzed.

Key words:

white light interferometry, surface profile measurement, peak detection of interferograms.

Введение

Метод сканирующей интерферометрии белого света основан на анализе набора интерференционных картин, сформированных двумя пучками света с малой длиной когерентности. Тогда, интерференционная картина на камере хранит информацию об оптической разности хода лучей. Таким образом, перемещая предметный столик вдоль вертикальной оси можно получить набор интерферограмм. Общая схема сканирующего интерферометра белого света изображена на рис. 1.

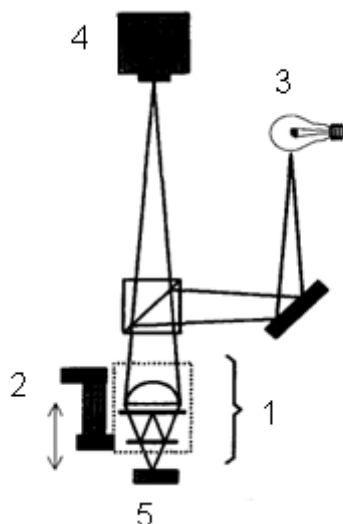


Рис. 1. Схематичный вид интерферометра белого света на основе объектива Мирау: 1 – интерференционный объектив; 2 – пьезостек; 3 – осветитель; 4 – камера; 5 – исследуемый объект

Для пучков с малой длиной когерентности максимум интерферограммы наблюдается когда оптическая разность хода равна нулю. Пики более высоких порядков имеют меньшие амплитуды за счет нарушения когерентности пучков. Типичный вид интерферограммы представлен на рис. 2.

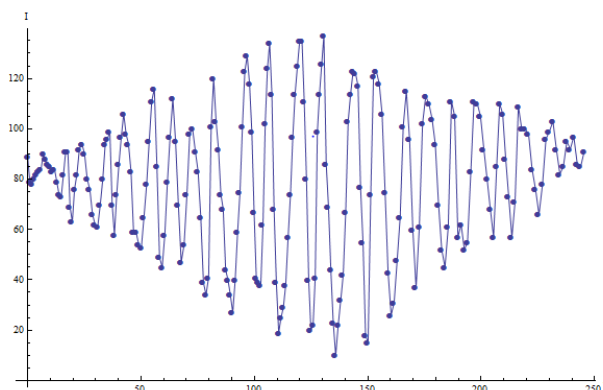


Рис. 2. Типичный вид интерферограммы

Как показано в [1], интенсивность интерференционной картины, если источник излучения имеет гауссов спектр, имеет вид:

$$I(x, y, z) = I_B(x, y)[1 + g(h(x, y) - z) \cos\{2k_c(h(x, y) - z) + \alpha(x, y)\}], \quad (1)$$

где $I_b(x, y)$ – излучение фона; $g(x, y)$ – амплитуда интерференционной картины; функция $g(x, y)$ и параметр k_c – среднее волновое число излучения, зависят от источника излучения; $\alpha(x, y)$ – сдвиг фазы при отражении.

Как правило, функция $g(x, y)$ имеет вид, близкий к функции Гаусса.

В дальнейшем зависимость от горизонтальных координат будем опускать. Тогда в дискретной форме выражение (1) примет вид:

$$I_i = I_B[1 + g(h - z_i) \cos\{2k_c(h - z_i) + \alpha\}] \quad (2)$$

Методы анализа интерферограмм

Существует множество методов анализа интерферограмм, которые различаются по вычислительной сложности, точности и устойчивости к шумам.

Простейшими методами анализа интерферограмм являются метод центра масс и метод Фурье. Их подробное описание можно найти в [2].

Широкое применение получил класс методов, основанных на методах фазосдвигающей интерферометрии. Подобный метод впервые был предложен в [3]. Наиболее часто используется адаптированный пятиточечный алгоритм фазосдвигающей интерферометрии, который имеет следующий вид:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{[4(I_2 - I_4)^2 - (I_1 - I_5)^2]^{1/2}}{-I_1 + 2I_3 - I_5}; \quad (3)$$

$$M = \frac{(I_2 - I_4)^2 \{4(I_2 - I_4)^2 - (I_1 - I_5)^2 + (-I_1 + 2I_3 - I_5)^2\}^{1/2}}{4(I_2 - I_4)^2 - (I_1 - I_5)^2}, \quad (4)$$

где φ и M – фаза и огибающая интерферограммы, соответственно.

Для данного метода существует множество алгоритмов компенсации ошибок [4, 5]. Однако даже в этом случае предъявляются жесткие требования к равномерности шага между кадрами.

Относительно недавно были разработаны так называемые вэйвлет-методы. Они основаны на применении вэйвлет-преобразования к интерферограммам. В предположении, что источник излучения имеет гауссов спектр, вэйвлет-преобразование имеет вид:

$$W_I(z') = \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-ik_c(z - z')] \exp\left[-\frac{(z - z')^2}{2w^2}\right] I(z) dz, \quad (5)$$

где параметр w определяется длиной когерентности источника излучения.

Огибающая может быть получена как модуль W . Вэйвлет-метод обладает высокой точностью, устойчивостью к шумам интенсивности и возможностью работы при частоте дискретизации ниже частоты Найквиста. Подробное описание вэйвлет-методов изложено в [6, 7].

Развитие компьютерных технологий позволило использовать прямые методы регрессионного анализа. Примером может служить описанный в [8] метод прямой квадратичной регрессии. Суть данного метода заключается в интерполяции амплитуды интерферограммы квадратичным полиномом, и, после приведения к линейным переменным, последующей квадратичной регрессией полученного выражения. Данный метод сочетает высокую точность и устойчивость к шумам. Возможна компенсация нелинейности движения плеча интерферометра и учет изменения фазы света при отражении от исследуемого образца.

Так же следует отметить, что существует множество специальных методов, направленных на работу с конкретной установкой, либо для анализа определенного класса образцов.

Например, в случае, если установка поддерживает установку нескольких светофильтров, то возможно автоматическое распознавание и компенсация изменения фазы излучения при отражении от образца [9].

Другим примером могут служить методы, разработанные для анализа интерферограмм, полученных при исследовании объектов, покрытых тонкими пленками [10].

Результаты моделирования

Для сравнения рассмотренных выше алгоритмов нами был сгенерирован следующий набор интерферограмм ($i = 0..100000, k = 0..200$):

$$I_{i,k} = \text{Int} \left\{ 128 + \cos(100 + \varepsilon_1 - k) \exp \left[\frac{-(h_i - k)^2}{20^2} \right] + \varepsilon_2 \right\}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – случайные величины, имеющие гауссово распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_1, σ_2 . Результаты моделирования представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что погрешности рассмотренных методов в зависимости от шумовых параметров в исходных данных согласуются с теоретическими предсказаниями. Наибольшей точности позволили достичь вэйвлет-метод и метод прямой регрессии. Метод Фурье позволил достичь высокой точности, в случае отсутствия шумов частоты дискретизации.

Табл. 1. Величина среднеквадратичного отклонения восстановленного профиля от истинного положения

	Метод центра масс	Метод Фурье	Метод фазосдвигающей интерфером	Вэйвлет метод	Метод прямой регрессии
$\sigma_1 = 0$ $\sigma_2 = 0$	0,7	0,005	0,015	0,010	0,007
$\sigma_1 = 0,25$ $\sigma_2 = 0$	1,1	1,6	0,3	0,03	0,05
$\sigma_1 = 0$ $\sigma_2 = 4$	1,3	0,007	0,012	0,012	0,013
$\sigma_1 = 0,25$ $\sigma_2 = 4$	1,5	2,1	0,4	0,04	0,06

Заключение

Рассмотрены методы анализа данных, получаемых при проведении измерений на сканирующем интерферометре белого света. Определены преимущества и недостатки каждого метода. Приведена сравнительная характеристика устойчивости к ошибкам. Построен модельный набор интерференционных картин. Проведено восстановление профиля поверхности по модельному набору интерференционных картин каждым из рассмотренных методов. Определено среднеквадратичное отклонение восстановленного профиля от реального положения для различных величин шумов в

интенсивности интерферограмм и в положении по вертикальной оси для каждого из рассмотренных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wojciech Kaplonek and Czeslaw Lukianowicz (2012). Coherence Correlation Interferometry in Surface Topography Measurements, Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy, Dr Ivan Padron (Ed.), ISBN: 978-953-51-0404-9.
2. Peter de Groot & Leslie Deck (1995): Surface Profiling by Analysis of White-light Interferograms in the Spatial Frequency Domain, Journal of Modern Optics, 42:2, P. 389–401.
3. **Harasaki, A.** Improved vertical-scanning interferometry / A. Harasaki, J. Schmit, J. Wyant // Applied optics. – 2000. – Т. 39. – №. 13. – P. 2107–2115.
4. **Schmit, J.** Some challenges in white light phase shifting interferometry / J. Schmit, A. Olszak // Interferometry XI: Techniques and Analysis. – 2002. – Т. 4777. – P. 118–127.
5. New algorithm of white-light phase shifting interferometry pursuing higher repeatability by using numerical phase error correction schemes of pre-processor, main processor, and post-processor / J. H. Kim [et al] // Optics and Lasers in Engineering. – 2008. – Т. 46. – №. 2. – P. 140–148.
6. **Sandoz, P.** Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry / P. Sandoz // Optics letters. – 1997. – Т. 22. – №. 14. – P. 1065–1067.
7. **Recknagel, R. J.** Analysis of white light interferograms using wavelet methods / R. J. Recknagel, G. Notni // Optics Communications. – 1998. – Т. 148. – №. 1. – P. 122–128.
8. **Park, M. C.** Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms / M. C. Park, S. W. Kim // Optical Engineering. – 2000. – Т. 39. – №. 4. – P. 952–959.
9. **Park, M. C.** Compensation of phase change on reflection in white-light interferometry for step height measurement / M. C. Park, S. W. Kim // Optics letters. – 2001. – Т. 26. – №. 7. – P. 420–422.
10. **Kim, S. W.** Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry / S. W. Kim, G. H. Kim // Applied Optics. – 1999. – Т. 38. – №. 28. – P. 5968–5973.