

УДК 550.34 + 622.831

АДАПТИВНАЯ ПОРОГОВАЯ ОБРАБОТКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Е. В. Сысоев, А. К. Поташников

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: evsml@mail.ru*

Предложен способ выбора адаптивного порога при обнаружении сигнала интерференции в оптическом профилометре, основанный на оценке оптического квантового шума в интерферограммах каждой измеряемой точки. Показано, что при использовании дифференциальных интерферограмм такой подход позволяет расширить динамический диапазон обнаружения интерференции и автоматизировать процесс измерения рельефа поверхностей, имеющих большой разброс коэффициента отражения света в зоне измерения. Приведены теоретические выкладки, результаты расчётов и экспериментов.

Ключевые слова: интерференция частично когерентного света, сканирующий интерферометр, адаптивный порог, интерференционный контроль рельефа поверхности, дифференциальная интерферограмма.

Введение. Измерение рельефа поверхности оптическим интерференционным профилометром проводится путём регистрации интерферограмм, образованных суммированием световых волн, рассеянных объектом измерения, и эталонной световой волны [1].

Обнаружение интерференции на фоне помех является одной из основных задач, которую приходится решать при измерении рельефа технических поверхностей методами низкокогерентной интерферометрии [2].

Методы обнаружения интерференции частично когерентного света при измерении рельефа шероховатых поверхностей в настоящее время разработаны недостаточно. Как правило, наличие интерференции определяется по нескольким интерферограммам, полученным суммированием двух и более световых волн, сдвинутых по фазе на некоторый заданный угол относительно друг друга, и применением обнаружителя с фиксированным порогом [3, 4]. Это даёт хороший результат при измерении рельефа с незначительным разбросом интенсивности рассеянного света поверхностью в зоне контроля [5].

Использование фиксированного порога при измерении рельефа технических поверхностей с неоднородным по полю измерения рассеянием света может привести к тому, что сигнал интерференции не будет регистрироваться в тех местах поля, в которых уровень отражённого света низкий. Это ведёт к увеличению погрешности измерений.

Целью данной работы является повышение достоверности измерения рельефа поверхности. Предложено для обнаружения сигнала использовать адаптивный порог, рассчитываемый на основе оценки квантового шума в интерферограммах для каждой измеряемой точки поверхности.

Фиксированный порог на неоднородной поверхности. Неоднородное рассеяние света измеряемой поверхностью может быть связано с неодинаковой по полю измерения отражающей способностью, локальным изменением направления отражения и т. д. В качестве примера на рис. 1 приведена интерферограмма металлической поверхности с поперечными размерами зоны контроля $2,4 \times 1,8$ мм. Из рисунка видно, что измеряемая поверхность имеет значительные перепады амплитуды рассеянного света, связанные с «некачественной» обработкой поверхности. Такой рельеф поверхности приводит к существенному

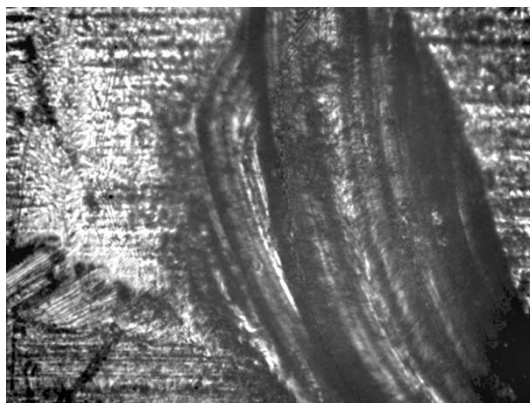


Рис. 1. Фрагмент измеряемой металлической поверхности

уменьшению сигнала интерференции для участков, с которых на фотоприёмник приходит мало света. Применение фиксированного порога, превышающего максимальный уровень шума, для обнаружения интерференции в этом случае становится проблематичным.

Рис. 2 иллюстрирует интенсивность (в одном из сечений объекта, приведённого на рис. 1) двух противофазных интерферограмм (график 1) и рассчитанный по ним (в соответствии с [6]) сигнал дифференциальной интерферограммы (ДИ) (график 2). Из рисунка видно, что на графиках 1 и 2 в зоне 3 амплитуда сигнала интерференции в ДИ меньше максимальной амплитуды шума, и применение фиксированного порога P приводит к тому, что интерференция в зоне 3 не регистрируется.

На рис. 3 даны изображения дифференциальной интерферограммы, полученные для участка поверхности, показанного на рис. 1. На изображениях информативные точки, в которых уровень сигнала отличен от нуля, выделены белым цветом. Как видно из рис. 3, *b*, после пороговой обработки число информативных точек на изображении ДИ существенно уменьшилось. Потеря информации при решении задачи контроля дефектов поверхности не желательна, так как это приводит к снижению достоверности контроля.

Адаптивный порог на неоднородной поверхности. Одним из основных источников шума в интерферограммах является квантовая природа света. Для стационарного теплового источника, например лампы накаливания, дисперсия квантового шума σ^2 равна среднему значению интенсивности света I , падающего на фотоприёмник [7]. Поскольку интенсивность I измеряется числом фотонов, падающих на фотоприёмник, и её дисперсия $\sigma^2 = I$, для повышения эффективности обнаружения интерференции на фоне шума предлагается применить адаптивный порог $P(x, y)$, рассчитываемый как величина, пропор-

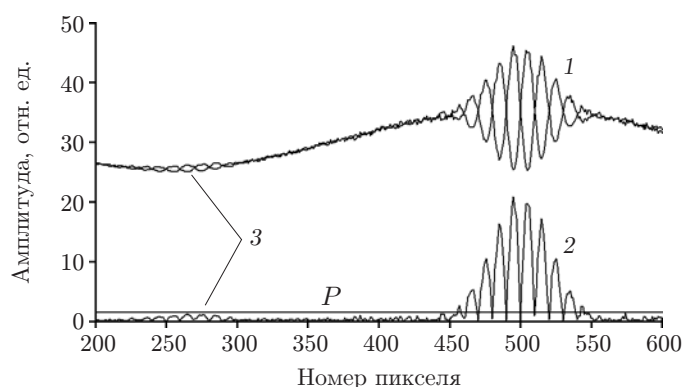


Рис. 2. Обнаружение интерференции с применением фиксированного порога

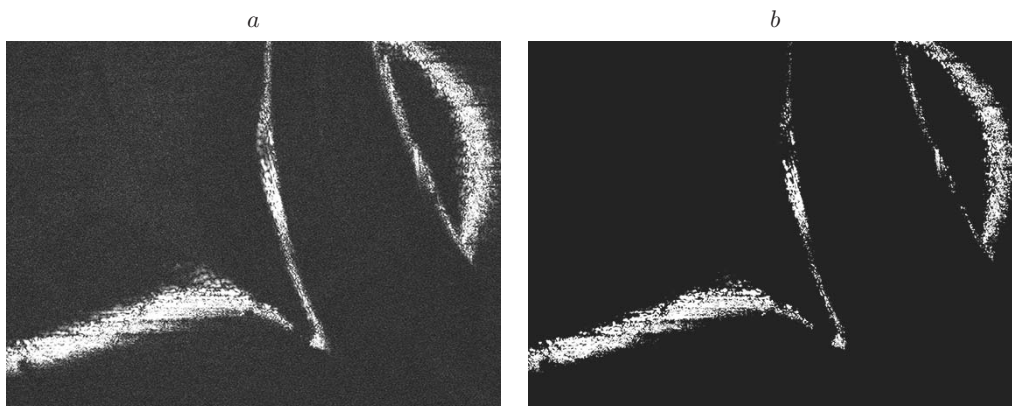


Рис. 3. Дифференциальная интерферограмма: *a* — исходная, *b* — после пороговой обработки

циональная квантовому шуму светового потока $I(x, y)$ в каждой точке интерферограммы (x, y) :

$$P(x, y) = k\sigma(I(x, y)), \quad (1)$$

где k определяется заданной вероятностью правильного обнаружения интерференции и зависит от решаемой задачи.

При регистрации интерферограмм фотоприёмником с линейным преобразованием интенсивности $I(x, y)$ выходной сигнал $U(x, y)$ можно представить в виде

$$U(x, y) = \alpha I(x, y). \quad (2)$$

Здесь коэффициент α характеризует чувствительность используемого фотоприёмника, а величина α^{-1} равна числу фотонов, необходимых для того, чтобы сигнал $U(x, y)$ изменился на единицу (в принятой размерности). Этот коэффициент может быть достаточно просто определён экспериментально. В том случае, когда квантовый шум является преобладающим и вкладом других источников шума можно пренебречь, выражение для дисперсии сигнала будет иметь вид

$$\sigma^2(U(x, y)) = \alpha^2 \sigma^2(I(x, y)).$$

Так как интенсивность $I(x, y)$ в процессе сканирования по высоте z меняется на каждом шаге i , то

$$\sigma^2(U(x, y, z_i)) = \alpha^2 \sigma^2(I(x, y, z_i)).$$

В оптическом профилометре [5] для измерения рельефа поверхности применяется метод ДИ, а обнаружение интерференции производится по разности сигналов $U^-(x, y, z_i)$ двух сдвинутых по фазе интерферограмм:

$$U^-(x, y, z_i) = U_1(x, y, z_i) - U_2(x, y, z_i),$$

где $U_1(x, y, z_i) = \alpha I_1(x, y, z_i)$; $U_2(x, y, z_i) = \alpha I_2(x, y, z_i \pm \bar{\lambda}/4)$ ($\bar{\lambda}$ — эффективная (средняя) длина волны используемого источника света). Интенсивности I_1 и I_2 можно представить в виде суммы полезного сигнала и фона:

$$I_1(x, y, z_i) = I_0(x, y, z_i) + \delta I(x, y, z_i), \quad I_2(x, y, z_i \pm \bar{\lambda}/4) = I_0(x, y, z_i) - \delta I(x, y, z_i),$$

где $I_0(x, y, z_i)$ — интенсивность фона в точке (x, y) ; $\delta I(x, y, z_i)$ — интерференционный член. В этом случае при суммировании U_1 и U_2 мы получаем сигнал $U^+(x, y, z_i)$, который пропорционален удвоенному значению фоновой составляющей:

$$U^+(x, y, z_i) = \alpha I^+(x, y, z_i) = 2\alpha I_0(x, y, z_i).$$

Общеизвестно, что при суммировании двух сигналов, содержащих некоррелированный по времени шум, дисперсии складываются, поэтому

$$\sigma^2(U^+(x, y, z_i)) = \sigma^2(U^-(x, y, z_i)) = \alpha^2 \sigma^2(I^+(x, y, z_i)). \quad (3)$$

С учётом (3) выражение (1) для дифференциальной интерферограммы преобразуется к виду

$$P(x, y, z_i) = k\sigma(I^+(x, y, z_i)). \quad (4)$$

На основе (1), (2) и (4) получаем выражение для расчёта адаптивного порога

$$P(x, y, z_i) = k\sqrt{U^+(x, y, z_i)/\alpha}. \quad (5)$$

Значение $P(x, y, z_i)$ вычисляется для каждой точки измеряемой поверхности на каждом шаге сканирования z_i . Для расчёта величины порога используются те же интерферограммы, что и для расчёта ДИ. Выражение (5) даёт возможность установить единый критерий, по которому выбирается уровень порога для обнаружения интерференции на фоне шума во всех точках измеряемой поверхности (например, правило трёх сигм).

В соответствии с выражением (5) минимальное значение порога будет определяться минимумом

$$P_{\min}(x, y, z_i) = \sqrt{U_{\min}^+(x, y, z_i)/\alpha}$$

сигнала $U^+(x, y, z_i)$ и сигнал интерференции в зоне 3 (см. рис. 2) будет обнаружен.

В качестве примера на рис. 4 показано применение адаптивного порога для обработки дифференциальной интерферограммы, представленной на рис. 2. Из рис. 4 видно, что

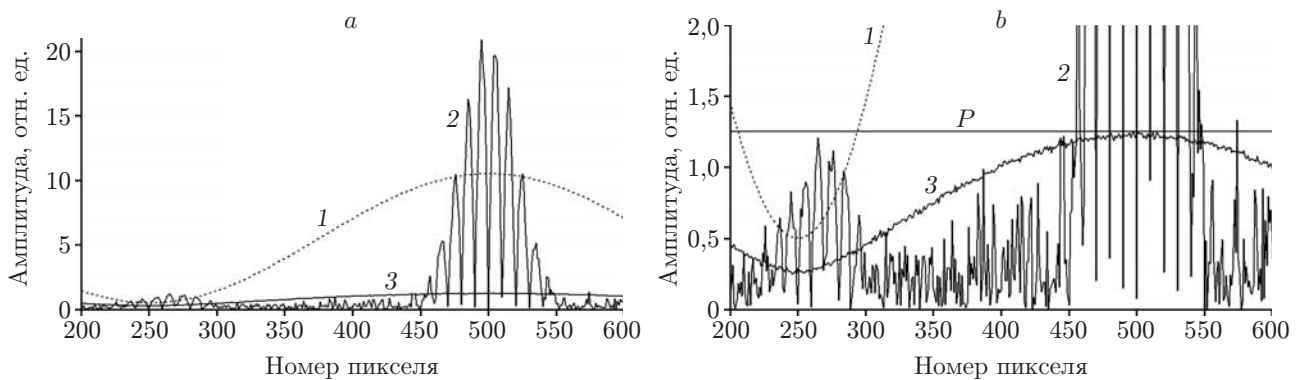


Рис. 4. Обнаружение сигнала интерференции на фоне шума с применением адаптивного порога: *a* — в выбранном масштабе, *b* — в увеличенном в 10 раз масштабе по высоте. Кривые 1 — изменение уровня средней интенсивности $I^+(x, y, z_i)/2$ по полю, 2 — модуль дифференциальной интерферограммы, 3 — адаптивный порог

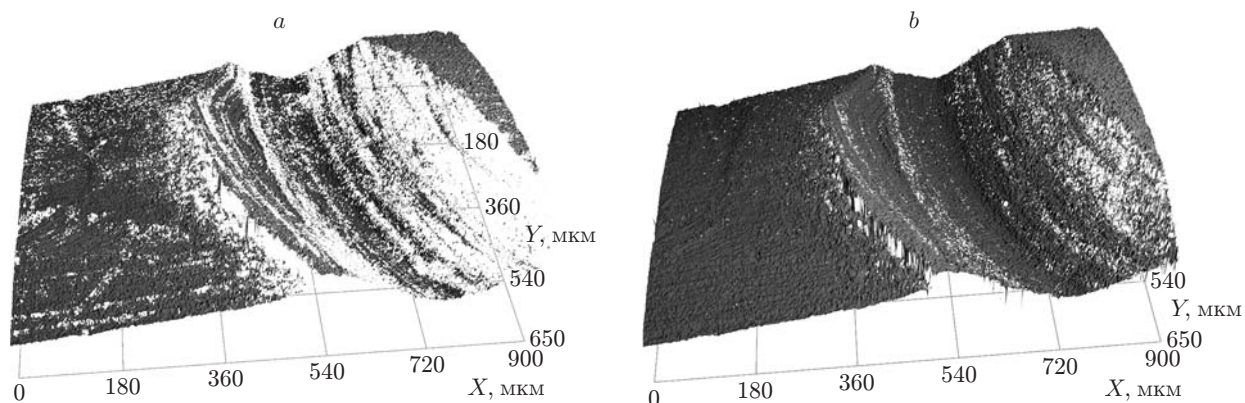


Рис. 5. Реконструированный рельеф поверхности по результатам обработки измерительных данных: фиксированным (а) и адаптивным (б) порогами

использование адаптивного порога позволяет обнаруживать интерференцию даже в тех местах, где контролируемая поверхность имеет низкий уровень рассеянного света.

На рис. 5, а, б представлены реконструированные 3D-рельефы поверхности по результатам обработки данных измерений с использованием постоянного и адаптивного порогов соответственно. Белым цветом выделены неизмеренные участки поверхности.

Расчёты показали, что при использовании фиксированного порога удалось измерить лишь 76 % площади исследуемой поверхности. Адаптивный порог позволил увеличить измеренную площадь до 96 %. Неизмеренными могли оказаться точки, для которых частота полос интерференции выше верхней пороговой частоты пропускания эквивалентного фильтра. Параметры фильтра определяются входной числовой апертурой оптической схемы интерферометра.

Автоматизация измерений рельефа поверхности. Одним из преимуществ процесса измерения является возможность автоматического контроля рельефа поверхности с большой величиной разброса интенсивности отражённого (рассеянного) света по измеряемой площади.

Использование ДИ в совокупности с предложенным методом выбора адаптивного порога, пропорционального квантовому шуму в каждой измеряемой точке, позволяет в автоматическом режиме измерять поверхности с большим разбросом по высоте рельефа. Для измерений в автоматическом режиме необходимо лишь один раз задать величину коэффициента k , определяющего критерий обнаружения интерференции. Например, для обнаружения сигнала интерференции на уровне шума с вероятностью 99,7 % (правило трёх сигм) необходимо в формуле (5) выбрать $k = 3$.

Заключение. В данной работе предложен метод и получено выражение для расчёта адаптивного порога обнаружения сигнала интерференции света в дифференциальных интерферограммах. Показано, что этот метод позволяет:

- расширить динамический диапазон обнаружения интерференции при измерении рельефа поверхности методом дифференциальных интерферограмм;
- установить единый критерий обнаружения сигнала интерференции на фоне шума, по которому рассчитывается адаптивный порог для обработки измерительных данных со всей анализируемой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chim S. S. C., Kino G. S. Correlation microscope // Opt. Lett. 1990. 15, Is. 10. P. 579–581.

2. **Pavlicek P., Hýbl O.** White-light interferometry on rough surfaces-measurement uncertainty caused by surface roughness // Appl. Opt. 2008. **47**, Is. 16. P. 2941–2949.
3. **Сысоев Е. В., Голубев И. В., Чугуй Ю. В., Шахматов В. А.** Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // Автометрия. 2004. **40**, № 5. С. 4–14.
4. **Ettl P., Schmidt B. E., Schenk M. et al.** Roughness parameters and surface deformation measured by coherence radar // Proc. SPIE. 1998. **3407**. P. 133–140.
5. **Борзов С. М.** Обнаружение динамических объектов по пространственно-временным аномалиям в видеопоследовательностях // Автометрия. 2013. **49**, № 1. С. 11–17.
6. **Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В. и др.** Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. 2010. **46**, № 2. С. 119–128.
7. **Лоудон Р.** Квантовая теория света. М.: Мир, 1976. 319 с.

Поступила в редакцию 22 февраля 2013 г.
