

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯ НАПРАВЛЕНИЙ

А.Г. Налимов, В.В. Котляр, Р.В. Скиданов
Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

В данной работе описывается метод измерения шероховатости поверхности. Поскольку задача прямого измерения шероховатости поверхности является трудновыполнимой при малой амплитуде шероховатости, проводятся косвенные измерения шероховатости за счет измерения плотности дислокаций на спекл-интерферограмме. Используется связь между плотностью дислокаций и амплитудой шероховатости исследуемой поверхности. Для поиска дислокаций используется поле направлений спекл-интерферограммы.

Введение

На практике для измерения степени шероховатости поверхности не всегда пытаются определять корреляционные функции неровностей поверхности, чаще ограничиваются определением некоторых средних параметров.

Известно [1], что комплексная амплитуда светового поля $F(x)$, являясь целой аналитической функцией, однозначно представляется всеми своими комплексными нулями

$$F(w) = Bw^k \exp(cw) \prod_{m=1}^{\infty} \left(1 - \frac{w}{w_m}\right) \exp\left(\frac{w}{w_m}\right) \quad (1)$$

где B, C – константы, $k \geq 0$ – целое число, $\{w_m\}$ – последовательность комплексных нулей.

Оказывается, что анализ средней плотности действительных нулей распределения интенсивности (приводящих к появлению развилок линий интерференции на спекл-интерферограмме) приводит к определению некоторых средних характеристик, описывающих статистику рассеивания поверхностей. В [2] показано, что средняя плотность нулей интенсивности в поперечном сечении двумерного спекл-поля в дальней зоне при рассеянии когерентного монохроматического света на фазовом экране (диффузоре) обратно пропорциональна средней площади спекла и не зависит явно от характеристик поверхности, в то время как в ближней зоне количество нулей интенсивности тем больше, чем меньше

радиус корреляции неровностей и чем больше их амплитуда.

1. Вычислительный эксперимент

Прохождение когерентного лазерного излучения через оптически прозрачный плоский элемент с шероховатой поверхностью изменяет набег фазы светового поля. При взаимодействии излучения, прошедшего через такой элемент с наклонной плоской волной результирующее поле представляет собой спекл-интерферограмму. Линии на спекл-интерферограмме местами разветвляются, образуя точки дислокаций. Плотность дислокаций равна нулю при интерференции двух плоских волн. При интерференции плоской волны с излучением, прошедшим через шероховатую поверхность, плотность дислокаций тем больше, чем больше амплитуда шероховатостей и их частота. Зная закон изменения плотности дислокаций от шероховатости поверхности, можно судить о неровности поверхности.

2. Оптическая схема

В работе моделировалось построение спекл-интерферограмм в оптической схеме, представленной на рис. 1.

На рис. 1 луч лазера (1) разделяется оптическим кубиком (2), после чего луч (2) отражается от зеркала (3) и, проходя через испытуемый прозрачный образец, регистрируется CCD камерой, а луч (1) – опорный пучок – отражается от зеркала 6 и попадает на чувствительный элемент CCD камеры.

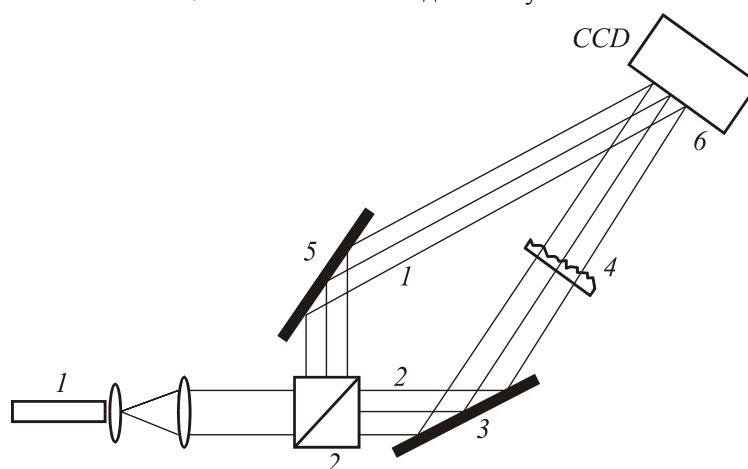


Рис 1 – Оптическая схема

Расстояние между элементом (4) и чувствительным элементом CCD камеры – 6 см, длина волны лазера – 633 нм, максимальная величина шероховатостей на поверхности $h_{\max} = \frac{1,5\lambda}{(n_2 - n_1)}$, где n_2

– показатель преломления испытуемого образца, n_1 – показатель преломления окружающей среды. При $n_1 = 1$, $n_2 = 1,5$ (стекло) максимальная амплитуда шероховатостей составит 1,9 мкм, частота горбов шероховатости – 200 мкм.

Для моделирования такой оптической схемы был разработан следующий алгоритм. Сначала производилось построение светового поля сразу за шероховатым элементом. Его амплитуда является постоянной величиной по всей площади, в то время как фаза отражает информацию о шероховатости поверхности. Набег фазы тем больше, чем толще пластинка в каждой конкретной точке. Для вычисления структуры пучка после прохождения им расстояния от шероховатого элемента до CCD камеры, к исходному изображению было применено преобразование Френеля.

На полученное изображение накладывается опорный пучок под заданным углом:

$$f_1(\xi, \eta, Z) = f(\xi, \eta, Z) + \exp\left(i2\pi \frac{\eta}{t}\right), \quad (2)$$

где $t = \frac{\lambda}{\cos(\alpha)}$ – коэффициент, зависящий от угла падения опорного пучка на чувствительный слой CCD камеры.

Параметры, использованные в вычислительном эксперименте: угол падения луча (2) на чувствительный элемент CCD камеры – 90° , опорный пучок имеет угол падения $89,4^\circ$, длина волны – $\lambda = 633 \cdot 10^{-9}$ м, период чередования полос в этом случае равен 59,1 мкм.

Луч (2), прошедший через элемент (4), имеет задержку по фазе, которая неравномерна по его сечению и прямо пропорциональна неровностям поверхности (4). В связи с этим на изображении интерферограммы появляется некоторое количество дислокаций, которое тем больше, чем больше шероховатости на поверхности (3) (рис. 2).

Бифуркации на спекл-интерферограмме схожи с особыми точками на дактилоскопических изображениях, вследствие чего для поиска дислокаций на изображении спекл-интерферограммы был адаптирован алгоритм поиска глобальных особенностей на дактилограммах, описанный в [3].

3. Поиск дислокаций по полю направлений.

Поиск координат дислокаций на спекл-интерферограмме проводился по полю направлений интерферограммы [4].

Поле направлений изображения – это функция координат точки, равная углу касательной к линии уровня интенсивности изображения. Так, если $I(x, y)$

– интенсивность света в изображении, то поле направлений $\varphi(x, y)$ определяется соотношением:

$$\operatorname{tg} \varphi(x, y) = -\frac{\partial I(x, y) / \partial x}{\partial I(x, y) / \partial y}, \quad 0 \leq \varphi(x, y) < \pi. \quad (3)$$

Построение поля направлений производилось с дискретностью по 10-ти углам. Это число устанавливалось экспериментально по наилучшему выявлению дислокаций на спекл-интерферограмме.

В тех местах, где полосы интерференционной картины пересекаются, поле направлений отражает это. В связи с дискретностью поля направлений в местах дислокаций появляются более двух направлений, границы которых пересекаются в одной точке (рис.3). Для визуализации отдельные направления на рис. 3 изображены различными полутонами в градации серого цвета.

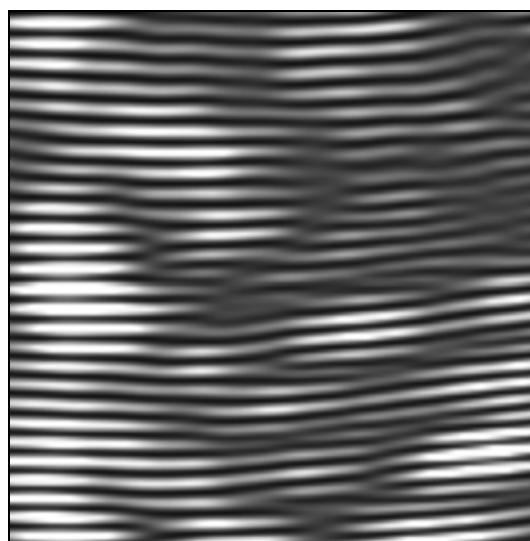


Рис. 2. Спекл-интерферограмма шероховатой поверхности

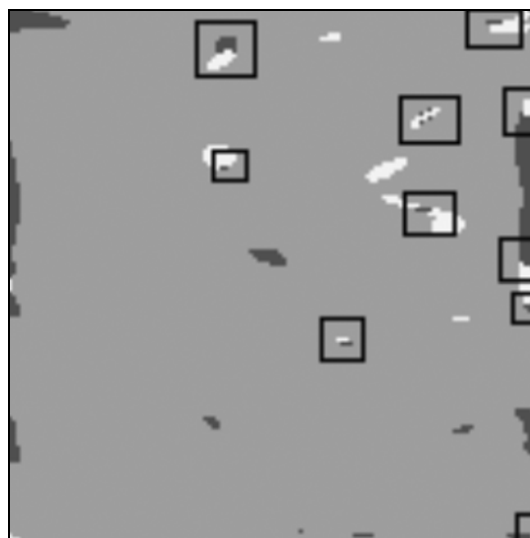


Рис. 3. Поле направлений с дислокациями (выделены прямоугольниками)

Как видно из рис. 3, места присутствия дислокаций на поле направлений выделить существенно

проще, чем на исходном изображении. Для автоматического поиска дислокаций, отраженных на поле направлений, был разработан следующий алгоритм. Маска размером $M \times M$ отсчетов пробегает все поле направлений, и при каждом ее положении подсчитывается количество различных направлений (на рис. 3 – количество градаций серого цвета), попавших в маску. Если их количество равно трем или больше, то точка дислокации определяется как центр тяжести самого маленького по площади участка одной градации серого цвета (направления). Амплитуда шероховатости считалась прямо пропорциональной концентрации дислокаций.

4. Обработка результатов моделирования

Для определения качества поверхности необходимо по относительному положению развилки и их плотности определить шероховатость поверхности в различных зонах. Чтобы проверить достоверность восстановления информации о шероховатости поверхности по развилкам, была смоделирована шероховатая поверхность с линейным увеличением размера шероховатости по одной координате от нуля до максимального значения $h_{\max} = \frac{1,5\lambda}{(n_2 - n_1)}$.

Среднеквадратичное отклонение определенной амплитуды шероховатостей от ее истинного значения вычислялось по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\bar{P} - P_n)^2}, \quad (4)$$

где \bar{P} – заданная усредненная амплитуда шероховатости, P_n – полученная на n -ом этапе амплитуда шероховатости после работы алгоритма.

СКО составило 27% (колебания среднего значения от 0,82% до 2,29%) в связи с относительно небольшим количеством дислокаций на исследуемом изображении (около 50). В реальных спекл-интерферограммах, для которых количество дислокаций может исчисляться десятками тысяч результатов, должен быть лучше.

Подсчет количества дислокаций в плоскости CCD камеры был произведен по 4-м вычислительным экспериментам. Для этого использовался размер апертуры диффузора 1,6×1,6 мм и такой же размер полученного изображения спекла в плоскости наблюдения. Максимальная величина шероховатости была выбрана таким образом, чтобы максимальный разброс в фазе луча, прошедшего диффузор, был равен $1,5 \lambda$.

Радиус корреляции неровностей диффузора элемента $r_c = 200$ мкм. Полученная средняя плотность дислокаций равна $4,88 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$, СКО этой величины составляет 45%, что является следствием большого разброса величины средней плотности дислокаций от эксперимента к эксперименту в связи с относительно небольшим размером изображения. Подсчет средней плотности дислокаций по формуле, полученной в [5] при тех же параметрах дает величину средней плотности $5,67 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$, что отличается на 14% от полученных при моделировании данных.

Заключение

Разработан метод автоматического поиска дислокаций по полю направлений спекл-интерферограммы. Проведен вычислительный эксперимент по оценке шероховатости поверхности по данным плотности дислокаций на спекл-интерферограмме. Оценена погрешность метода определения шероховатости по спекл-интерферограмме. Проведен эксперимент по подсчету средней плотности дислокаций при конкретных параметрах оптической схемы и полученный результат сопоставлен с известными данными.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-1007.2003.1 и российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» («BRHE»).

Литература

1. Левин Б.Я. Распределение корней целых функций // М.: ГИТТЛ, 1956. 243с.
2. Баранова Н.Б., Зельдович Б.Я. Дислокации поверхностей волнового фронта и нули амплитуды // ЖЭТФ, 1981. Т. 80. Вып. 5. С. 1789-1797.
3. Скиданов Р.В., Налимов А.Г. Метод поиска особых точек дактилоскопических изображений с использованием поля направлений // Компьютерная оптика, 2002. Вып. 23. С. 69-74.
4. Soifer V.A., Kotlyar V.V., Khonina S.N., Khramov A.G., Skidanov R.V. Image recognition using a direction field technique // Proceedings of SPIE: Digital image processing and computer graphics (DIP'97), 1998. V.3346.
5. Котляр В.В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук // СФ ФИАН, Самара, 1988.