

## ОСЦИЛЛЯЦИИ КОНТРАСТА РАССЕЯННОГО ПОЛЯ ПРИ ДИФРАКЦИИ СФОКУСИРОВАННЫХ ПУЧКОВ НА ФАЗОВЫХ ЭКРАНАХ С ДИСКРЕТНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ СПЕКТРОМ

© Д.А.Зимняков, И.С.Переточкин, Д.Н.Агафонов

Исследуется эффект осцилляций статистического момента второго порядка флуктуаций интенсивности рассеянного поля (контраста) в дальней зоне при дифракции когерентных гауссовых пучков на фазовых структурах с дискретным пространственным спектром. Методами статистического моделирования анализируется влияние параметров рассеивающих объектов с фрактальной и субфрактальной структурой на зависимости контраста рассеянного поля от условий его формирования. Показано, что возрастание значений хаусдорфовой размерности для фрактальных и субфрактальных структур приводит к уменьшению и в конечном итоге к подавлению осцилляций контраста. Полученные результаты могут быть использованы при разработке дифракционных методов диагностики шероховатых поверхностей с квазипериодической структурой.

Анализ статистических характеристик флуктуаций интенсивности рассеянного поля при дифракции когерентных пучков на фазовых объектах является основой для разработки методов диагностики этих объектов [1-3]. В качестве подобных характеристик используются нормированные моменты второго и более высоких порядков, причем наиболее часто — значение второго момента (контраста):

$$\beta = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2)^{0.5} / \langle I \rangle, \quad (1)$$

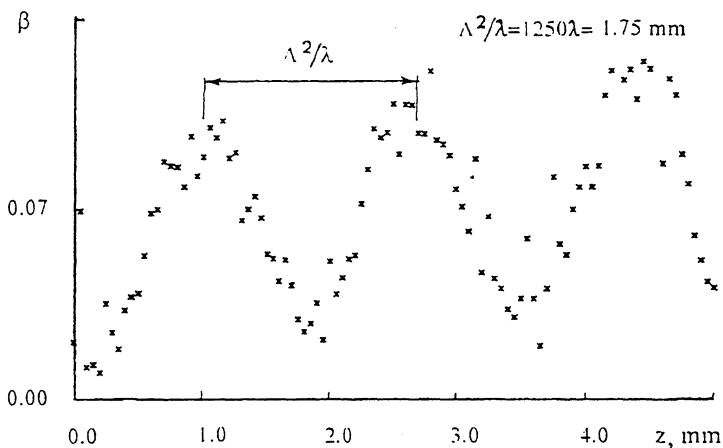
где усреднение осуществляется по ансамблю реализаций рассеивателя.

Для объектов с непрерывным пространственным спектром флуктуаций фазы граничного поля [4] в определенных областях наблюдается немонотонное поведение контраста, обусловленное проявлением фокусирующих свойств локальных фазовых неоднородностей [4] (“микролинзовый эффект”). В зависимости от условий формирования рассеянного поля максимальные значения контраста могут наблюдаться в зоне ближнего поля [1,4] (при освещении объекта монохроматической плоской волной с однородным распределением амплитуды) либо в зоне дифракции Фраунгофера [3] (если используется сфокусированный освещающий

пучок). Анализ положения и величины максимумов контраста в зависимости от условий освещения рассеивателя, описываемого моделью фазового экрана, позволяет определить обобщенные характеристики флуктуаций фазы (среднеквадратичное значение  $\sigma_\phi$  и длину корреляции  $l_\phi$ , описывающие структуру объекта.

Хорошо известно, что для фазовых объектов с дискретными эквидистантными спектрами (и соответственно регулярным характером распределений фазы) в случае освещения коллимированными пучками наблюдается эффект их самовоспроизведения на расстояниях  $z_m = m\Lambda^2/\lambda$  от объекта (где  $m$  — целое число,  $\Lambda$  — максимальный пространственный период флуктуаций фазы,  $\lambda$  — длина волны зондирующего пучка) [5]. При этом в пространстве за объектом зоны амплитудной модуляции рассеянного поля (визуализируется фазовая структура рассеивателя) чередуются с зонами равномерной освещенности (“зонами размытия”), где имеет место фазовая модуляция рассеянного поля. Наличие подобных продольных периодических структур рассеянного поля должно приводить в случае использования сфокусированных освещающих пучков к периодическим осцилляциям зависимости контраста в дальней зоне дифракции от параметра дефокусировки  $\Delta z$ , определяемого смещением рассеивателя относительно плоскости перетяжки пучка. Эти осцилляции, непосредственно определяемые глубиной модуляции флуктуаций интенсивности в плоскости детектирования сигнала, могут наблюдаться, например, в параксиальной области дальней зоны при сканировании исследуемого образца сфокусированным пучком. В качестве примера на рис. 1 приведена полученная в эксперименте зависимость контраста рассеянного поля от величины смещения вдоль оптической оси для двумерной периодической структуры, представляющей собой дифракционную решетку-растр с периодом 35 мкм. В качестве источника излучения использован одномодовый He-Ne лазер ЛГН-207; зондирующий пучок фокусировался с помощью объектива с фокусным расстоянием 200 мм, смещение образца в продольном и поперечном направлениях осуществлялось с помощью двухкоординатного микропозиционера (минимальный шаг дискретизации интенсивности при сканировании в поперечном направлении равен 0.25 мкм). Как и следовало ожидать, полученное в эксперименте расстояние между двумя последовательными максимумами контраста хорошо согласуется со значением  $\Lambda^2/\lambda$  для исследуемого объекта.

Таким образом, как и в случае фазовых оптически неоднородных структур с непрерывными спектрами флуктуаций фазы, исследование зависимостей контраста рассеяв-



**Рис. 1.** Фрагмент зависимости контраста рассеянного поля  $\beta$  в параксиальной области дальней зоны дифракции от величины смещения фазового рассеивателя (двумерного раstra) вдоль оптической оси. Модуляция фазы при дифракции зондирующего пучка на растре  $\cong 0.15\pi$  (оценено из отношения интенсивностей для различных дифракционных порядков); конфокальный параметр зондирующего пучка  $\cong 40$  мм.

ного поля от параметра дефокусировки при сканировании объекта сфокусированным пучком может быть применено как метод экспресс-анализа фазовых объектов с регулярной структурой, причем максимальное и минимальное значения контраста, а также форму зависимости  $\beta(\Delta z)$  можно использовать для оценки глубины модуляции фазы, создаваемой объектом.

Значительный интерес также представляют исследования проявлений данного эффекта для фазовых структур с неэквидистантным дискретным пространственным спектром, и в первую очередь для так называемых фрактальных и субфрактальных частотно-ограниченных (band-limited) структур [6]. "Частотная ограниченность" предполагает проявление фрактальных свойств в ограниченном диапазоне пространственных частот ("физические" фракталы в отличие от идеализированных "математических"). Субфрактальные фазовые структуры, исследованные в ряде работ (в частности, Джейкменом [7]) порождают непрерывные однократно дифференцируемые пространственные распределения фазы  $\phi(r)$ , для которых фрактальными свойствами будут обладать первые производные, описывающие локальный "наклон" фазового рельефа. Понятие субфракталь-

ности допускает развитие на случай непрерывных конечное число раз дифференцируемых распределений, при этом субфрактал второго порядка будет описывать фрактальные свойства локальной кривизны волнового фронта граничного поля, а субфрактал нулевого порядка — фрактальное распределение фазы и т. д. Хорошей моделью для описания свойств фрактальных и субфрактальных фазовых объектов с ограниченным дискретным спектром является одномерная функция Вейерштрасса [6], которая после соответствующей модификации дает распределение фазы граничного поля непосредственно за объектом в следующей форме:

$$\phi^k(x) = C_k \sum_{i=1}^N b^{(D-2-k)i} \cos(2\pi b^i s x + \varphi_i), \quad (2)$$

где  $D$  — хаусдорфова размерность;  $C_k$  — постоянная, определяемая величиной флуктуаций  $\sigma_\phi$ ;  $k$  — “порядок субфрактальности”;  $b$  и  $s$  — параметры структуры, причем  $s$  имеет размерность пространственной частоты;  $N$  — число гармоник;  $x$  — координата в плоскости объекта. Фазы пространственных гармоник  $\varphi_i$  являются независимыми случайными величинами, равномерно распределенными в интервале  $(0, 2\pi)$ . Необходимо отметить, что в рамках данных представлений фазовый экран с моногармоническим распределением фазы граничного поля может быть интерпретирован как субфрактальный объект с бесконечно большим значением  $k$ , при условии, что  $C_k b^{D-2-k}$  есть конечная величина, равная  $\sqrt{2\sigma_\phi}$ .

С целью исследования эффекта осцилляций контраста в дальней зоне для подобных структур было проведено статистическое моделирование дифракции гауссовых пучков на субфрактальных структурах различных порядков. Исследовались зависимости контраста рассеянного поля от параметра дефокусировки для субфрактальных фазовых экранов с различными  $D$ ,  $k$  и  $C_k$ . Процесс смены реализаций рассеивателя при вычислении контраста моделировался путем разыгрывания  $N$  случайных величин  $\{\varphi_i\}$ . Как и в случае фазовых экранов с дискретным эквидистантным спектром, исследуемые субфрактальные структуры при определенных значениях  $D$ ,  $k$  и  $C_k$  также демонстрируют периодический характер зависимости  $\beta(\Delta z)$ . Рис. 2 иллюстрирует эволюцию формы минимумов контраста при возрастании  $D$ ,  $k$  и  $C_k$ . Необходимо отметить, что период осцилляций  $\beta$  контролируется значением  $(sb)^{-1}$ , соответствующим периоду первой гармоники субфрактальной структуры. Умень-

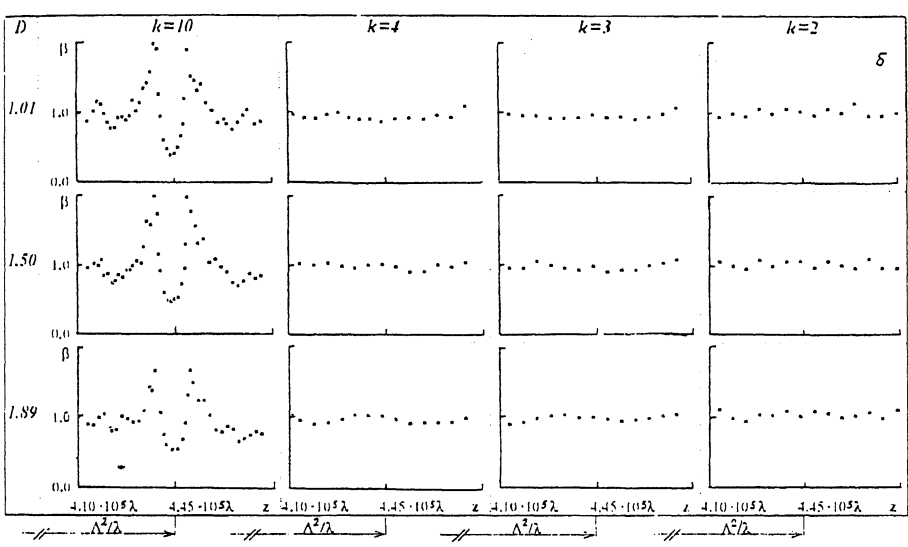
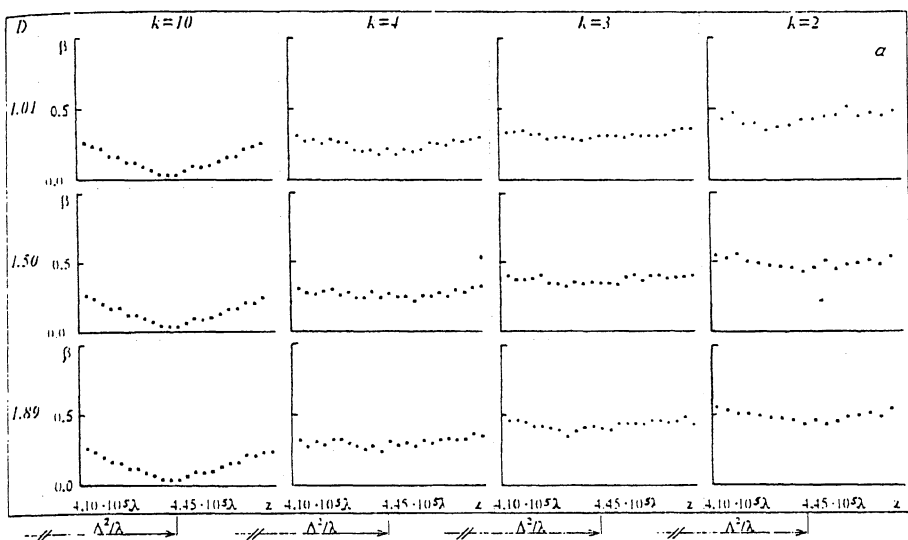


Рис. 2. Фрагменты зависимостей контраста рассеянного поля в параксиальной области дальней зоны от параметра дефокусировки (в единицах длин волн) при дифракции гауссового пучка на фрактальных и субфрактальных фазовых экранах с дискретным спектром (результаты статистического моделирования); а —  $\sigma_\varphi = 0.5$ , б —  $\sigma_\varphi = 10$ . Использованы следующие параметры модели: число гармоник  $N = 20$ ,  $sb\lambda = 1.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Delta = (sb)^{-1}$ .

шение  $k$ , как и возрастание  $D$  и  $C_k$ , приводит к увеличению амплитуд высших гармоник и их вклада в формирование рассеянного поля, что при неэквидистантном характере пространственного спектра субфрактальной структуры дает уменьшение глубины модуляции контраста на зависимости  $\beta(\Delta z)$ . Обращает на себя внимание полное подавление осцилляций контраста для фрактальных структур ( $k = 0$ ) при больших значениях  $C_k$  (и соответственно  $\sigma_\phi$ ). Данный результат согласуется с приводимыми Джейкменом [7] результатами моделирования и экспериментальными данными, свидетельствующими об отсутствии эффекта "формирования каустик" для фрактальных фазовых экранов в ближней и дальней зонах и близости значений контраста формируемых спекл-полей к значениям, характерным для классического случая полностью развитых спекл-полей [8]. Проведенное рассмотрение позволяет рекомендовать метод анализа контраста в дальней зоне дифракции при сканировании исследуемых объектов сфокусированными когерентными пучками в качестве метода исследований структуры фракталоподобных частотно-ограниченных объектов с дискретными спектрами флуктуаций фазы.

#### Список литературы

- [1] Ангельский О.В., Магун И.И., Максимьяк П.П. и др. // Опт. и спектр. 1991. Т. 71. В. 6. С. 1021-1026.
- [2] Kadoho H., Asakura T., Takai N. // Optik. 1988. V. 80. N 3. P. 115-120.
- [3] Зимняков Д.А., Мишин А.А. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 9. С. 85-96.
- [4] Рытов С.М., Кравцов О.А., Татарский В.И. // Введение в статистическую радиофизику. Т. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
- [5] Боровицкая Ч.М., Зулькаркеева Е.Ю., Кособуро Т.П. и др. // Экспериментальная радиооптика / Под ред. В.А. Зверева, Н.С. Степанова. М.: Наука, 1979. С. 83-98.
- [6] Jaggard D.L., Kim J. // JOSA. 1987. V. 4. N 6. P. 1055-1062.
- [7] Джейкмен Э. // Сб. трудов 6 Международной конф. "Фракталы в физике" / Под ред. Э. Пьетронеро и Ф. Тозатти. М.: Мир, 1988. С. 82-91.
- [8] Dainty J.C. Topics in Applied Physics. V. 9. Berlin: Springer, 1975. 286 p.

Институт проблем точной  
механики и управления  
РАН  
Саратов

Поступило в Редакцию  
15 октября 1996 г.