

О ДВУМОДАЛЬНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ ДЛЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ФАЗОВЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

Д.А.Зимняков, В.В.Тучин

Исследования негауссовых спекл-полей при рассеянии сфокусированных пучков на случайных фазовых экранах (СФЭ) являются одной из важных проблем когерентной оптики [1,2]. Свойства формируемых в дальней зоне дифракции спекл-структур в случае рассеивателей с большими длинами корреляции l_u граничного поля [3], удовлетворяющими условию $l_u \simeq L$ (L — характерные размеры освещаемой области), будут определяться характеристиками объекта и параметрами, описывающими условия рассеяния освещающего пучка (конфокальным параметром [4] и параметром дефокусировки, определяемым смещением образца относительно плоскости перетяжки пучка). Для рассеивателей со среднеквадратичными значениями флуктуаций фазы граничного поля $\sigma_\phi > 1$ статистические характеристики спекл-полей в зоне Фраунгофера будут существенно зависеть от величины l_c/L , где l_c — длина корреляции фазы граничного поля. В области малых значений $\sigma_\phi l_u \simeq l_c$; когда $\sigma_\phi \gg 1$, $l_u \simeq l_c/\sigma_\phi$ [3].

При значениях $l_c/L \ll 1$ и $\sigma_\phi \gg 1$ формируемые в дальней зоне спекл-структуры удовлетворяют условиям возникновения развитого спекл-поля [5]. Для значений $l_c/L \gg 1$ при нахождении СФЭ в плоскости перетяжки пучка процесс формирования рассеянного поля будет контролироваться статистическими свойствами градиента фазы граничного поля; при этом значения нормированных моментов интенсивности рассеянного поля (в частности, контраста $V = (\langle(I - \langle I \rangle)^2\rangle)^{0.5}/\langle I \rangle$ и коэффициента асимметрии $Q_a = (\langle(I - \langle I \rangle)^3\rangle)/(\langle(I - \langle I \rangle)^2\rangle)^{1.5}$ существенно превышают эти величины для развитого спекл-поля ($V = 1$ и $Q_a = 2$) [1,5].

Исследования особенностей поведения статистических характеристик спекл-структур в области $l_c \simeq L$ в зависимости от параметров СФЭ l_c и σ_ϕ представляют значитель-

ный интерес как с точки зрения теории формирования частично развитых спекл-структур с негауссовой статистикой комплексной амплитуды, так и с точки зрения разработки методов диагностики рассеивающих объектов с использованием сфокусированных пучков.

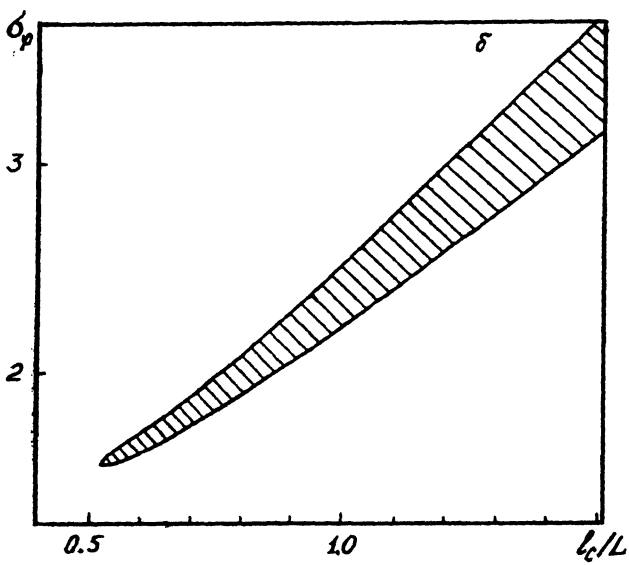
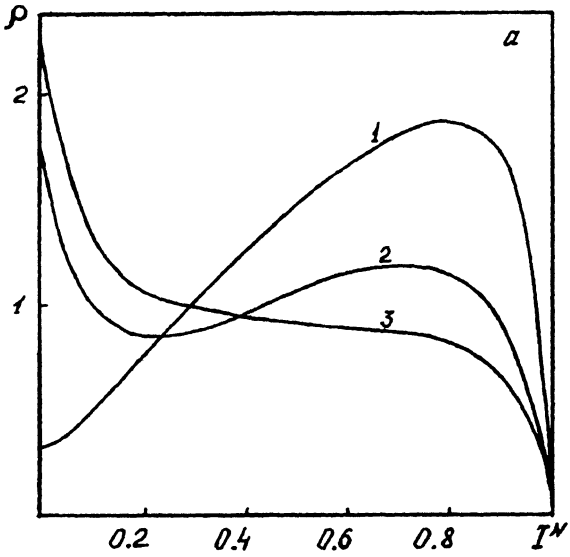
В работе исследованы особенности эволюции распределений интенсивности частично развитых спекл-полей в параксиальной области дальней зоны для крупномасштабных фазовых рассеивателей при измерении нормированной длины корреляции l_c/L . Проведены экспериментальные исследования формы эмпирических функций плотности вероятности (ФПВ) интенсивности спекл-структур, формируемых при освещении крупношероховатых стеклянных пластинок ($R_a \simeq 0.2 - 2.5$ мкм, $l_c \gg \lambda$) сфокусированным лазерным пучком с различными значениями диаметра фокального пятна для образцов, расположенных в плоскости перетяжки. Особенности поведения ФПВ интенсивности в области $l_c/L \simeq 1$ также изучались путем статистического моделирования дифракции пучков с ограниченной апертурой на СФЭ. Рассматривались СФЭ с гауссовым распределением и автокорреляционной функцией $R_{\phi\phi}(\tau_x, \tau_y) = \sigma_\phi^2 \exp[-(\tau_x^2 + \tau_y^2)/l_c^2]$ фазы граничного поля; волновой фронт освещающего пучка предполагался плоским, амплитуда поля постоянной по освещаемому участку.

Построение ФПВ нормированной интенсивности спекл-поля в параксиальной области зоны Фраунгофера производилось путем перебора реализаций двумерных распределений фазы $\phi(x, y)$ с заданными значениями l_c и σ_ϕ с накоплением вычисленных по каждой реализации значений нормированной интенсивности:

$$I^N(0, 0) = (AL^2)^{-2} \left| \int_{-L/2}^{L/2} dy \int_{-L/2}^{L/2} \exp(j\phi(x, y)) dx \right|^2, \quad (1)$$

где $A = 1$ — амплитуда поля освещающего пучка.

Характерной особенностью полученных распределений значений $I^N(0, 0)$ является их двумодальный характер в области $l_c/L \simeq 1$ (рис. 1, а). Существование двух максимумов ФПВ наблюдается для значений $l_c/L \geq 0.5$ в узком диапазоне величин σ_ϕ и обусловлено переходом от режима формирования развитого спекл-поля к режиму “дефлексии” (модуляции направления распространения освещающего пучка локальными фазовыми неоднородностями СФЭ без существенного разрушения его пространственной структуры). На рис. 1, б показана область существования



двумодальных распределений в координатах $(\sigma_\phi, l_c/L)$ для СФЭ с гауссовыми автокорреляционной функцией и законом распределения фазы. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) эффект двумодальности имеет "пороговый" характер и не наблюдается в области малых значений l_c/L ($l_c/L \leq 0.5$);

2) для больших значений нормированной длины корреляции фазы L_c/L зависимости $\sigma_\phi^H = \varphi(l_c/L)$, $\sigma_\phi^L = \varphi(l_c/L)$, определяющие область существования двумодальности для заданной l_c/L ($\sigma_\phi^L \leq \sigma_\phi \leq \sigma_\phi^H$), аппроксимируются линейными функциями (рис. 1, б, $l_c/L \geq 0.8$).

С целью интерпретации подобных свойств рассмотрим критерий постоянства среднеквадратического значения флуктуаций фазы по апертуре:

$$\langle (\phi^2) S \rangle^{0.6} = \left(\left\langle \frac{1}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} dy \int_{-L/2}^{L/2} (\phi(x, y) - \bar{\phi}_s)^2 dx \right\rangle_\phi \right)^{0.5} = \text{const}, \quad (2)$$

где символ $\langle \rangle_\phi$ соответствует усреднению по ансамблю реализаций, $\bar{\phi}_s$ — среднее по апертуре значение фазы. Проводя усреднение для больших значений l_c/L , выражение (2) можно преобразовать к виду

$$\sigma_\phi \left(1 - \frac{1}{D^2} \int_{-L/2}^{L/2} dy \int_{-L/2}^{L/2} r_{\phi\phi}(x, y) dx \right)^{0.5} = \text{const}, \quad (3)$$

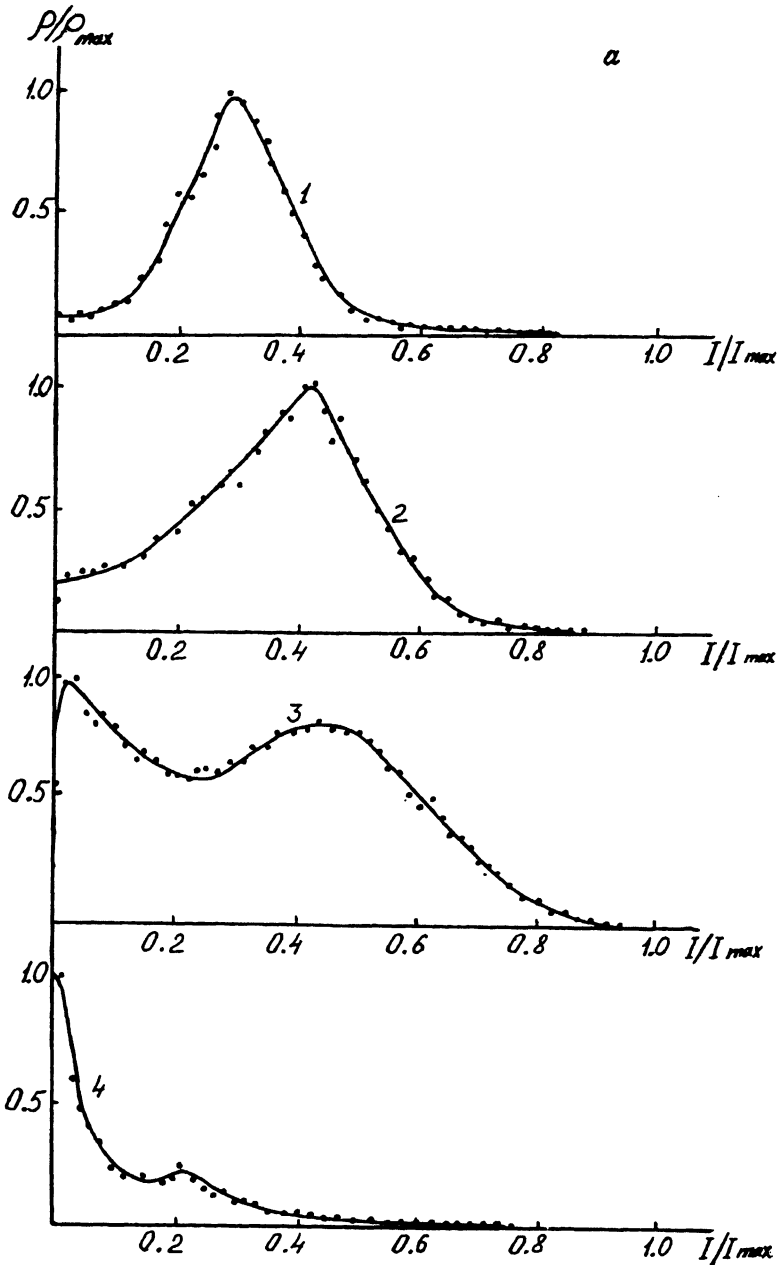
где $r_{\phi\phi}(x, y) = R_{\phi\phi}(x, y)/\sigma_\phi^2$. Для гауссовых СФЭ, проводя интегрирование и учитывая только квадратичные члены в разложении по L/l_c , получим $\sigma_\phi L/l_c = \text{const}$, что соответствует линейному характеру зависимостей $\sigma_\phi^H(l_c/L)$,

Рис. 1. Двумодальность функций плотности вероятности интенсивности спекл-полей в дальней зоне дифракции для крупномасштабных гауссовых случайных фазовых экранов (результаты статистического моделирования).

а — изменение формы ФПВ интенсивности спекл-поля с ростом σ_ϕ при фиксированном значении параметра $l_c/L = 1.2$; 1 — $\sigma_\phi = 2.43$, 2 — $\sigma_\phi = 2.97$, 3 — $\sigma_\phi = 3.15$.

б — область существования двумодальных ФПВ интенсивности для модельных СФЭ с гауссовой автокорреляционной функцией фазы граничного поля в координатах " $l_c/L - \sigma_\phi$ ".

a



$\sigma_\phi^L(L_c/L)$. Оценка значений $(\langle\phi^2\rangle_S)_H^{0.5}$, $(\langle\pi^2\rangle_S)_L^{0.5}$, соответствующих двумодальному режиму дифракции, дает соответственно 0.96 и 0.77.

В экспериментах также регистрировался эффект двумодальности распределений интенсивности спекл-поля в дальней зоне. Образец располагался в плоскости перетяжки освещающего лазерного пучка, формируемого объективом с фокусным расстоянием $f = 410$ мм. Изменение параметра $l_c L$ производилось путем изменения диаметра коллимированного пучка на выходе телескопической системы, поступающего затем на вход объектива; в результате диаметр фокального пятна изменялся как $\lambda f/D$ (D — диаметр коллимированного пучка). Построение эмпирических ФПВ интенсивности производилось в процессе смены реализаций распределений фазы рассеивателя при сканировании в поперечном направлении. Диаметр диафрагмы фотоприемника, расположенного в дальней зоне (300 мкм), был существенно меньше среднего размера спеклов. Образцы представляли собой стеклянные пластины со среднеквадратичными значениями высоты σ_h и длинами корреляции l_h микронеровностей 0.2–2.5 и 25–45 мкм соответственно (по результатам профилометрических измерений). Эквивалентные значения σ_ϕ и l_c/L составляли от 1 до 12.5 и от 0.2 до 3.

Эффект двумодальности наблюдался для образцов с $\sigma_\phi \simeq 1.0$ –2.5 при значениях $l_c D/1.22\lambda f$ в диапазоне от 0.5 до 0.8; для крупношероховатых образцов с $\sigma_\phi \geq 4.0$ –5.0 при изменении параметра $l_c D/1.22\lambda f$ от 0.2 до 2 эффект не наблюдался (рис. 2, а, б). Данные результаты качественно согласуются с результатами моделирования (рис. 1, б). Необходимо отметить, что полученные экспериментальные данные допускают только качественное сопоставление с результатами моделирования, поскольку статистика фазы граничного поля для используемых в эксперименте рассеивателей может существенно отличаться от гауссовой.

В связи с этим в дальнейшем предполагаются более детальные исследования влияния статистических и корреляционных свойств СФЭ на характеристики двумодальных распределений интенсивности с целью разработки методов

Рис. 2. Эволюция формы эмпирических ФПВ нормированной интенсивности спекл-поля в параксиальной области дальней зоны для различных значений параметра $\chi = l_c D/1.22\lambda f$. Исследуемые образцы — крупношероховатые стеклянные пластины с различными значениями σ_ϕ .

а — $\sigma_\phi \simeq 1.5$; 1 — $\chi = 1.59$, 2 — $\chi = 0.79$, 3 — $\chi = 0.56$, 4 — $\chi = 0.28$.

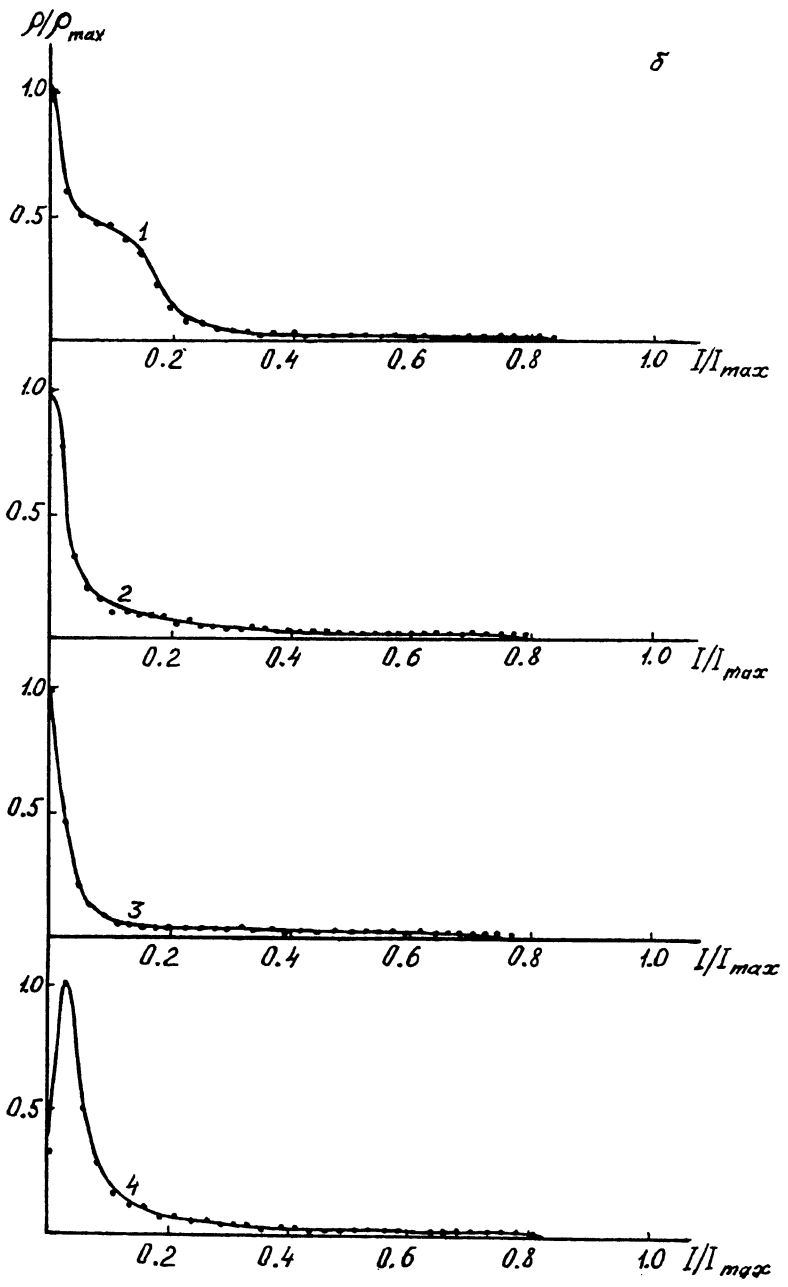


Рис. 2 (продолжение). б — $\sigma_\phi \approx 5.0$; 1 — $\chi = 2.00$, 2 — $\chi = 1.39$, 3 — $\chi = 0.70$, 4 — $\chi = 0.35$.

диагностики крупномасштабных оптически неоднородных объектов (в том числе и для биомедицинских приложений).

Авторы выражают благодарность доценту В.П. Рябухо за любезно предоставленные образцы для исследований.

Список литературы

- [1] *Jakeman E.* // *Optical Engineering*. 1984. V. 23. N 4. P. 453-461.
- [2] *Kadono H., Asakura T., Takai N.* // *Optik*. 1988. V. 80. N 3. P. 115-120.
- [3] *Рытов С.М., Крацов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
- [4] *Гончаренко А.М.* Гауссовы пучки света. Минск: Наука и техника, 1977. 144 с.
- [5] *Dainty J.C.* Laser speckle and related phenomena. *Topics in Applied Physics*. V. 9. Springer, Berlin, 1975. 286 p.

Саратовский филиал
Института машиноведения РАН

Поступило в Редакцию
21 августа 1994 г.