

ПРОЯВЛЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ФУРЬЕ-СПЕКТЛОГРАММЫ ПОПЕРЕЧНОГО СДВИГА

© И.С.Клименко, В.П.Рябухо

В [1-4] на основе регистрации двухэкспозиционной фурье-голограммы поперечного сдвига рассеивателя показана возможность интерференционного контроля волновых aberrаций оптической системы в диффузно когерентном свете. Цель настоящей работы — показать влияние aberrаций на спектр-структуру поля в плоскости фурье-образа рассеивателя при его поперечном сдвиге.

Для компенсации взаимного наклона спектр-полей, возникающего в фурье-плоскости при поперечном сдвиге рассеивателя [5], между экспозициями в [1-4] изменялся угол наклона опорного пучка. Поскольку при регистрации распределения интенсивности поля фазовые множители “выпадают”, то для исключения влияния наклона спектр-полей можно воспользоваться методом спектр-фотографии, если предположить, что при поперечном сдвиге рассеивателя имеет место смещение спеклов в фурье-плоскости. Действительно, в [1-4] для наблюдения полос интерференции, отражающих волновые aberrации в зрачке оптической системы, использовался метод пространственной фильтрации восстановленного поля в голографической интерферометрии [6,7]. Вместе с тем в [6,7] показано, что если при пространственной фильтрации поля, восстановленного с двухэкспозиционной голограммы, наблюдаются полосы периода Λ , то это свидетельствует о наличии в плоскости фильтрации поперечного взаимного сдвига спектр-полей на величину $\Delta\zeta = \lambda f / \Lambda$, где f — расстояние до плоскости наблюдения интерференционной картины или фокусное расстояние линзы, используемой для фурье-преобразования отфильтрованного поля. Таким образом, несмотря на утверждение автора работы [1-4] о совпадении идентичных спектр-полей двух экспозиций в фурье-плоскости смещаемого матового экрана и локализации в этой плоскости полос интерференции, следует сделать обратный вывод о наличии смещений спеклов в фурье-плоскости при поперечном сдвиге рассеивателя. Для прямого подтверждения этого вывода в настоящей работе

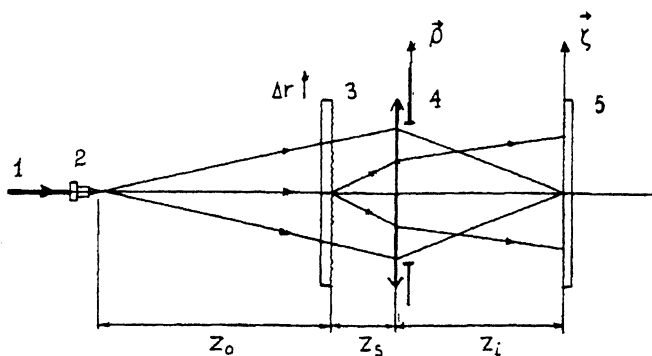


Рис. 1. Схема записи двухэкспозиционной фурье-спеклограммы поперечного сдвига рассеивателя: 1 — лазерный пучок; 2 — микрообъектив; 3 — рассеиватель; 4 — оптическая система; 5 — фотопластинка.

по схеме, представленной на рис. 1, регистрировались двухэкспозиционные фурье-спеклограммы поперечного сдвига рассеивателя. На рис. 2 представлена интерферограмма, наблюдаемая в дальней зоне дифракции при освещении спеклограммы лазерным пучком. Величина поперечного сдвига рассеивателя $\Delta r \approx 500$ мкм, расстояние $z_i \approx 470$ мм, апертура линзы $D \approx 70$ мм, фокусное расстояние $f \approx 260$ мм, расстояние рассеиватель—линза $z_s \approx 120$ мм. Форма интерференционных полос, как видно из рис. 2, заметно отличается от прямолинейной формы полос Юнга [5], но аналогична форме полос, отражающих сферическую aberrацию линзы [8]. Вместе с этим наблюдается весьма низкий контраст полос, свидетельствующий о заметной декорреляции спекл-структуры при поперечном сдвиге рассеивателя. Смещение спекл-структуры и ее декорреляция уменьшаются при уменьшении апертуры оптической системы, поскольку уменьшаются aberrации системы [8,9]. Прямые наблюдения спекл-структуры в фурье-плоскости с помощью микроскопа также показывают смещение и “кипение” спеклов при поперечном сдвиге рассеивателя.

Таким образом, поперечный сдвиг рассеивателя влечет за собой пространственное смещение спеклов в плоскости предполагаемого фурье-образа рассеивателя. На первый взгляд это противоречит свойству инвариантности распределения интенсивности поля фурье-образа к поперечному сдвигу предмета (теореме сдвига) [10]. Однако если учесть наличие волновых aberrаций оптической системы и ограниченность размеров выходного зрачка, то становится ясным, что в такой системе не выполняется точное фурье-преобразование [11], следовательно и не реализуется выше-

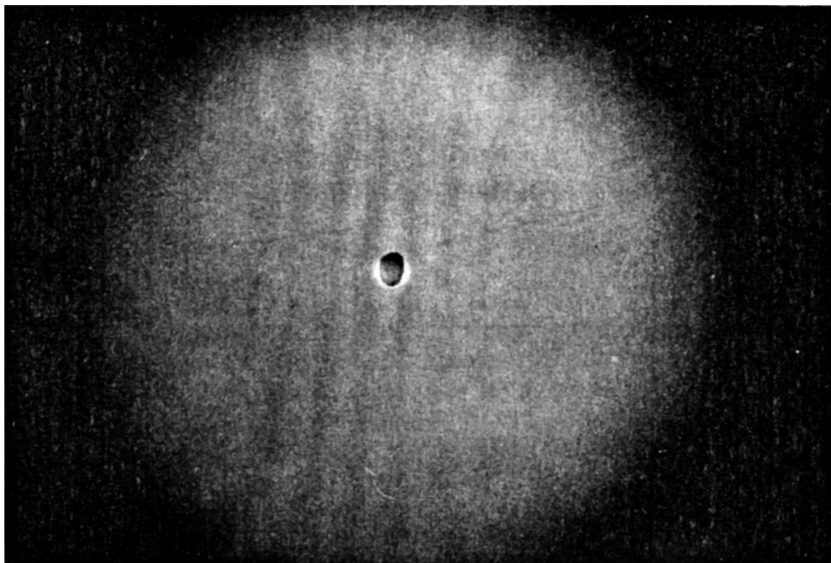


Рис. 2. Интерферограмма, наблюдаемая при дифракции лазерного пучка на фурье-спеклограмме, поперечного сдвига рассеивателя.

упомянутое свойство. Это означает, что спекл-поле в плоскости предполагаемого фурье-образа при смещении рассеивателя не только приобретает линейный фазовый набег, но и претерпевает пространственный сдвиг и структурные изменения, обусловленные влиянием волновых aberrаций оптической системы.

Теоретический анализ структурных изменений поля в фурье-плоскости смещаемого рассеивателя при наличии волновых aberrаций преобразующей оптической системы представляет, на наш взгляд, определенные трудности даже в случае простой сферической aberrации. Однако для подтверждения полученных результатов и адекватной их интерпретации достаточно рассмотреть простейший вид волновой aberrации — ошибку фокусировки [10]. В этом случае искажения волнового фронта в выходном зрачке системы могут быть записаны с помощью фазовой функции $\Phi(\rho) = k\varepsilon\rho^2/2$, а комплексная амплитуда поля в плоскости предполагаемого фурье-образа рассеивателя (т. е. при выполнении условия $1/z_i + 1/(z_0 + z_s) = 1/f$) в приближении дифракции Френеля можно записать в виде

$$U_1(\zeta) = C \iint_{-\infty}^{+\infty} U(\rho)P(\rho) \exp\left(i\frac{k\varepsilon}{2}\rho^2\right) \exp\left(i\frac{k}{z_i}\zeta\rho\right) d^2\rho, \quad (1)$$

где C — комплексный сомножитель; $U(\rho)$ — комплексная амплитуда спекл-поля в зрачке оптической системы (рис. 1); $P(\rho)$ — амплитудное пропускание зрачка. Если рассеиватель переместился в собственной плоскости на величину Δr , то можно показать [5], что в плоскости апертуры оптической системы спекл-поле сместится на величину $\Delta \rho = (1 + z_s/z_0)\Delta r$. Поэтому для смещенного положения рассеивателя выражение (1) следует записать в виде

$$U_2(\zeta) = C \exp\left(i\frac{k\varepsilon}{2}(\Delta\rho)^2\right) \exp\left(i\frac{k}{z_i}\zeta\Delta\rho\right) \iint_{-\infty}^{+\infty} U(\rho)P(\rho + \Delta\rho) \times \\ \times \exp\left(i\frac{k\varepsilon}{2}\rho^2\right) \exp\left[i\frac{k}{z_i}(\zeta + \varepsilon z_i\Delta\rho)\rho\right] d^2\rho. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что распределения интенсивности поля до и после смещения рассеивателя связаны соотношением

$$I_2(\zeta) \simeq I_2(\zeta - \Delta\zeta),$$

где знак \simeq означает, что кроме сдвига на величину $\Delta\zeta = z_i\varepsilon\Delta\rho$ спекл-структура претерпевает некоторые декорреляционные изменения за счет конечных размеров зрачка. На это указывает произведение $U(\rho)P(\rho + \Delta\rho)$ в интеграле (2): если $|\Delta\rho| \geq D$, где D — диаметр зрачка, то декорреляция будет полной, поскольку во втором положении рассеивателя зрачок заполнится полностью другим спекл-полем. При записи двухэкспозиционной фурье-спеклограммы и последующем зондировании спеклограммы лазерным пучком в дифракционном поле будут наблюдаться достаточно контрастные полосы Юнга, если $|\Delta\rho| \ll D$, с периодом $\Lambda = \lambda/\Delta\zeta$, определяемым величиной сдвига рассеивателя $|\Delta r|$ и абберационным параметром ε .

Используя этот результат, можно дать следующую интерпретацию формы интерферограммы, приведенной на рис. 2. При записи спеклограммы поверхность фотослоя находилась в плоскости фокусировки непараксиальных (широких) пучков света. Следовательно, пространственный сдвиг испытали крупные спеклы, формируемые в узких пучках света. Поэтому на интерферограмме в области низких пространственных частот наблюдаются полосы малого периода. Мелкие спеклы формируются в широких пучках, для которых отсутствует дефокусировка ($\varepsilon \simeq 0$), и они не испытывают сдвига ($\Delta\zeta = 0$). Поэтому в высокочастотной области интерферограммы период полос увеличивает

ся. Если поверхность фотослоя расположить в фокусе параксиальных лучей, то в соответствии с вышеприведенными суждениями в низкочастотной области период полос будет максимален, а в низкочастотной — минимален. Наблюдается характерная луковичевидная форма полос, как и на обычных интерферограммах сдвига, отображающих сферическую аберрацию (см. рис. 4.6 в [8]).

Разделение на крупные и мелкие спеклы весьма условно. В действительности следует говорить об относительно мелких и крупных элементах спекл-структуры, которые при сдвиге рассеивателя испытывают различное по величине смещение. Это сопровождается разрывами спеклов и, как следствие, декорреляционными изменениями спекл-структуры в целом. Именно поэтому спекл-интерферограммы имеют низкий контраст.

Вышеприведенные представления позволяют понять зависимость формы полос, наблюдаемых в [1-4] при изменении положения плоскости записи фурье-голограммы; отсутствует компенсация локального наклона поля или для высокочастотных, или для низкочастотных пространственных составляющих этого поля.

Следует отметить, что влияние аберраций оптической системы при регистрации двухэкспозиционной спеклограммы сфокусированного изображения рассматривалось в [12,13]. Наблюдаемые в [14,15] осцилляции видности и эффект обращения контраста спекл-интерферограммы продольного смещения также могут быть объяснены с точки зрения вышерассмотренного поведения отдельных элементов регистрируемой спекл-структуры.

Список литературы

- [1] Гусев В.Г. // Опт. и спектр. 1989. Т. 66. В. 4. С. 921-924.
- [2] Гусев В.Г. // Опт. и спектр. 1990. Т. 69. В. 5. С. 1125-1128.
- [3] Гусев В.Г. // Опт. и спектр. 1991. Т. 71. В. 1. С. 171-174.
- [4] Гусев В.Г. // Опт. и спектр. 1994. Т. 77. В. 5. С. 847-850.
- [5] Франсон М. Оптика спеклов / Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 171 с.
- [6] Клименко И.С., Рябухо В.П. // Прикладные вопросы голографии. Материалы XIV школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1982. С. 62-80.
- [7] Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
- [8] Оптический производственный контроль / Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [9] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
- [10] Гудман Дж. Введение в фурье-оптику / Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 364 с.
- [11] Применение методов фурье-оптики / Под ред. Г. Старка. Пер. с англ. под ред. И.Н. Компанца. М.: Радио и связь, 1988. 536 с.
- [12] Ракушин Ю.А. // Прикладные вопросы голографии. Материалы XIV школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1982. С. 141-146.

- [13] Ракушин Ю.А. // Опт. и спектр. 1987. Т. 62. В. 6. С. 1395-1398.
- [14] Клименко И.С., Кричко Т.В. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С. 162-166.
- [15] Клименко И.С., Кричко Т.В., Рябузо В.П. // ЖТФ. 1991. Т. 61, В. 9. С. 73-81.

Институт бизнеса, информатики
и телекоммуникаций
Москва

Поступило в Редакцию
3 мая 1996 г.

