

М. В. ОКУЛОВ

## МОДЕЛЬ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЛУЧАЙНОГО ФАЗОВОГО ОБЪЕКТА

Рассматривается зависимость величины контраста в плоскости изображения системы визуализации фазовых неоднородностей от величины поперечного смещения фильтра пространственных частот. Приведена модель системы, основанной на методе пространственной оптической фильтрации.

**Ключевые слова:** метод Фуко, фазовый нож Гильберта, фазовый контраст.

**Введение.** Необходимость диагностики фазовых неоднородностей возникает при решении множества исследовательских и прикладных задач. Чисто фазовым называется прозрачный объект, изменяющий фазу, но не амплитуду проходящего излучения [1, 2]. Возникновение подобных объектов может быть обусловлено неравномерностью плотности исследуемой среды и ее химического состава или наличием температурного поля.

Одной из областей применения методов диагностики фазовых объектов являются океанологические исследования, в которых такие объекты определяются неравномерностями полей температуры и солености морской воды. Опыт исследований, проведенных с использованием лазерного теневого прибора морского базирования, показал, что в реальных условиях эксплуатации он подвергается различным нагрузкам (в частности, вибрационным), вызывающим смещение фильтра пространственных частот и разъюстировку оптической системы. Один из возможных способов компенсации линейных децентрировок — использование пьезоактюатора в системе обратной связи, перемещающего фильтр для его точного центрирования. В данной ситуации необходимо понимание того, каким образом смещение фильтра влияет на качество изображения.

**Постановка задачи.** Исследование влияния линейных смещений фильтра пространственных частот на процесс и результат визуализации фазового контраста осуществляется путем численного моделирования. Моделируемая система основана на схеме двойной дифракции (схеме 4F), изображенной на рис. 1. В плоскости I, совпадающей с передней фокальной плоскостью линзы  $L_1$ , располагается прозрачный транспарант, освещаемый плоской волной. Плоскость II, совпадающая с задней фокальной плоскостью линзы  $L_1$  и передней фокальной плоскостью линзы  $L_2$ , содержит фильтр пространственных частот. Плоскость III — задняя фокальная плоскость линзы  $L_2$  — является плоскостью изображения системы [2, 3].

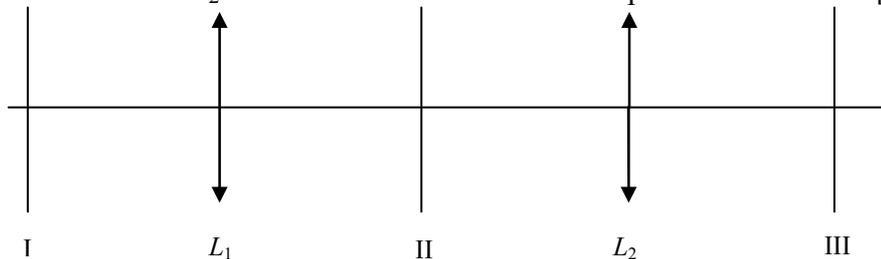


Рис. 1

Распространение оптического поля между плоскостями I и II описывается преобразованием Фурье, осуществляемым тонкой линзой  $L_1$ . Численно этот процесс моделируется быстрым преобразованием Фурье. Действие фильтра пространственных частот в плоскости II определяется перемножением результата предыдущего преобразования и численного представления фильтра, описываемого двумерным массивом значений функции пропускания. Линза  $L_2$

формирует фурье-преобразование результата, полученного на предыдущем этапе, в плоскости  $\Pi$ , что численно также моделируется быстрым преобразованием Фурье.

В модели должна быть предусмотрена возможность произвольного задания параметров, описывающих случайный фазовый объект, и поперечного смещения фильтра пространственных частот. Основные параметры модели следующие: фазовый транспарант имеет вид квадрата с длиной стороны 10 мм, длина волны излучения 632,8 нм, фокусное расстояние линз 250 мм. Размеры фазового транспаранта выбраны в соответствии с характерными размерами ПЗС-матриц. Выбор источника излучения и фокусных расстояний линз обусловлен их легкой доступностью, что важно на этапе физического моделирования.

**Описание компьютерной модели.** Компьютерная модель системы, предназначенной для визуализации случайных фазовых неоднородностей методом оптической фильтрации пространственных частот, состоит из двух модулей.

Первый программный модуль осуществляет генерацию модели транспаранта, содержащего множество одиночных фазовых объектов в виде дисков. При этом координаты, диаметр объекта и величина вносимого им фазового смещения являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Значения математического ожидания и дисперсии каждой из перечисленных величин задаются пользователем. Результатом работы программы является двумерный массив, выводимый в виде изображения и сохраняемый в файл. На рис. 2 представлен пример сгенерированного программой транспаранта со следующими параметрами: количество одиночных фазовых объектов 100; математическое ожидание координат центра объекта соответствует центру транспаранта, дисперсия координат по каждой из двух осей составляет 2 мм; математическое ожидание размера объекта 0,2 мм, дисперсия 0,05 мм; математическое ожидание фазового смещения, вносимого в волновой фронт проходящей волны, 0,1 рад, дисперсия 0,01 рад.

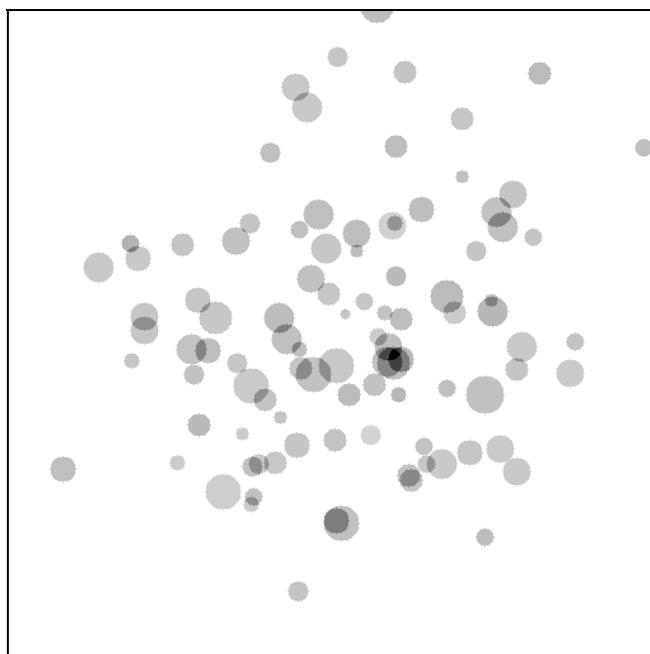


Рис. 2

Второй программный модуль осуществляет непосредственно моделирование процесса визуализации фазового контраста в системе двойной дифракции. Визуализируемый транспарант описывается массивом, сгенерированным первой программой. Используемый фильтр и величина его поперечного смещения выбираются и задаются пользователем. На настоящий момент реализация модели предоставляет выбор между фильтром Гильберта [4] и ножом Фуко.

Результатом работы второго программного модуля является выводимое изображение, отображающее распределение интенсивности в плоскости изображения системы визуализации фазового контраста. Также на экране выводятся максимальное  $I_{\max}$  и минимальное  $I_{\min}$  значения интенсивности изображения (относительно принятой за условную единицу интенсивности волны, освещающей фазовый транспарант) и значение контраста, рассчитываемое по формуле

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}.$$

После получения результатов для отцентрованного фильтра задается его смещение на некоторую величину и вычисляется новое значение контраста.

**Результаты.** При визуализации фазового транспаранта (см. рис. 2) получены картины распределения интенсивности в плоскости изображения системы. На рис. 3, *а* показано распределение интенсивности при визуализации фазового транспаранта с использованием центрированного ножа Фуко. Контраст изображения приближается к единице, но максимальная интенсивность составляет всего 7 % от интенсивности освещающей волны. Причиной этого является перекрытие нулевой пространственной частоты, переносящей большую часть энергии и соответствующей равномерно засвеченному фону. На рис. 3, *б* приведено изображение того же фазового транспаранта, визуализируемого с помощью ножа Фуко, смещенного на 10 мкм в область отрицательных пространственных частот. Контраст также приближается к единице, но максимальная интенсивность изображения снижается из-за более полного перекрытия зрачка оптической системы ножом. При смещении же ножа в область положительных пространственных частот контраст снижается, но интенсивность изображения, как видно на рис. 3, *в*, значительно повышается вследствие прекращения подавления нулевой пространственной частоты.

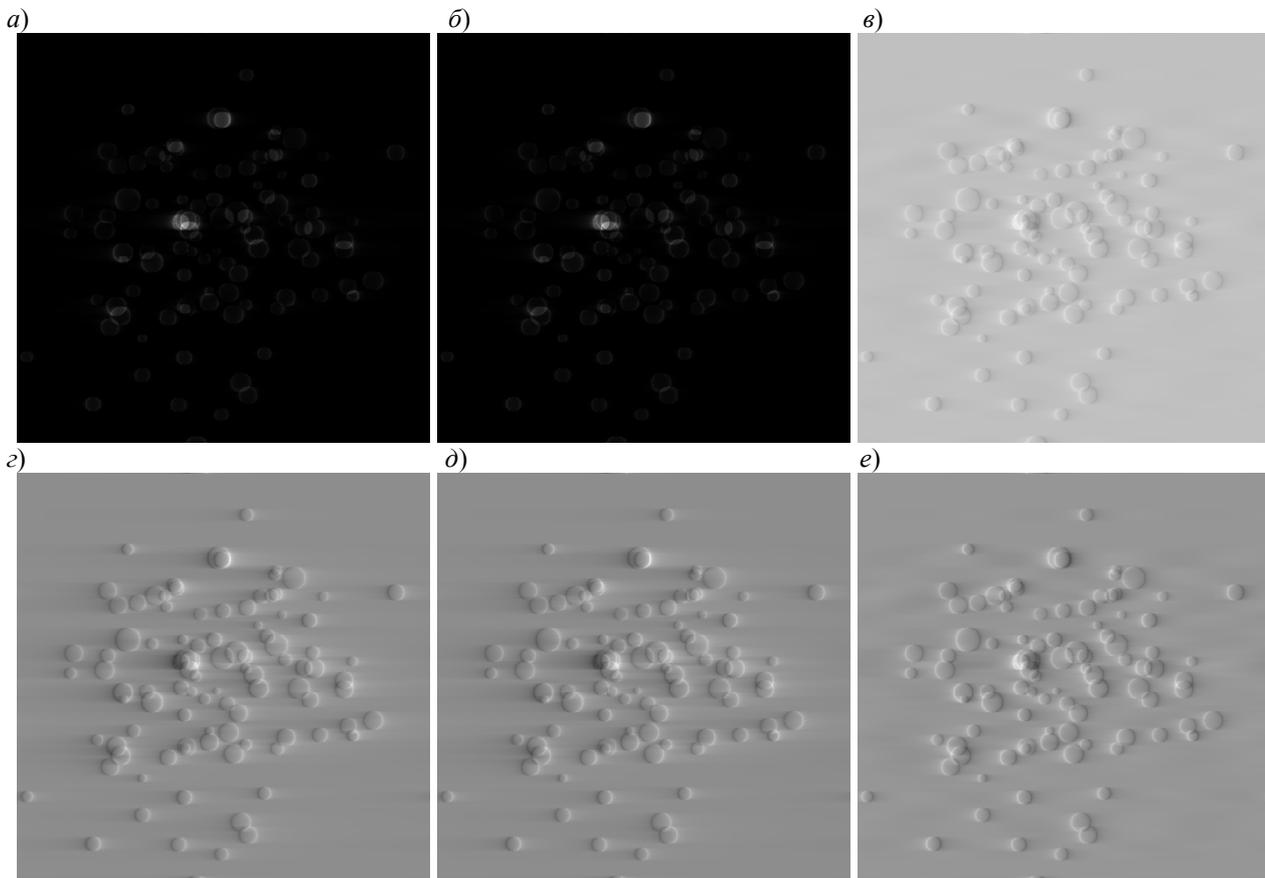


Рис. 3

При использовании фильтра Гильберта зависимость значения контраста от смещения фильтра имеет другой вид. Поскольку фильтр Гильберта является непоглощающим, интенсивность изображения будет оставаться высокой при любых смещениях фильтра. На рис. 3, *г* представлен результат визуализации фазового транспаранта с использованием центрального фильтра Гильберта, а на рис. 3, *д* и *е* соответственно — с использованием фильтра Гильберта, смещенного на 10 мкм в область отрицательных и положительных пространственных частот.

График зависимости контраста изображения ( $C$ ) на выходе системы двойной дифракции от величины поперечной децентрировки (смещения) фильтров пространственных частот ( $\Delta$ ) приведен на рис. 4. Как уже было сказано, при смещении ножа Фуко в область отрицательных пространственных частот контраст изображения приближается к единице, но общая интенсивность изображения падает. Поэтому равный единице контраст в данной ситуации не может свидетельствовать о преимуществах использования ножа Фуко по сравнению с фильтром Гильберта.

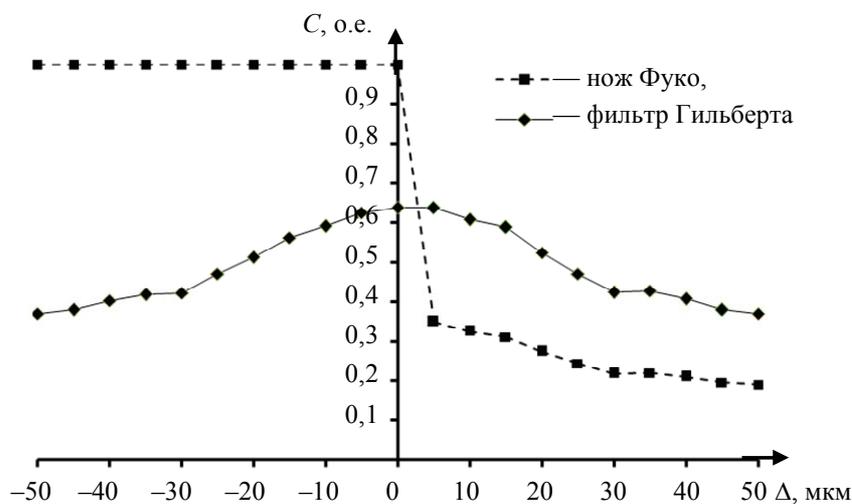


Рис. 4

**Выводы.** В ходе исследований установлено, что система фильтрации пространственных частот, основанная на фильтре Гильберта, менее чувствительна к поперечным децентрировкам фильтра. Контраст оказывается ниже, чем при использовании ножа Фуко, но это достигается лишь за счет подавления пространственных частот, в результате чего минимальная интенсивность оказывается близкой к нулю. Кроме того, подавление гармоник при смещении ножа Фуко в область отрицательных пространственных частот вызывает резкое снижение качества изображения. Следует отметить, что при внесении в модель дополнений, учитывающих эффекты дифракции на оправках линз, контраст изображения, полученного с использованием ножа Фуко, не будет равен единице. Это обусловлено дифракционным „расплыванием“ нулевой пространственной частоты, что снизит эффективность ее подавления, и, как следствие, интенсивность фона не будет обнуляться.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gluckstad J., Palima D.* Generalized phase contrast: applications in optics and photonics // Springer Ser. in Optical Sciences. 2009. Vol. 146.
2. *Гудмен Дж.* Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.
3. *Коротков П. А., Смирнов С. А.* Анализ когерентных теневых методов наблюдения фазовых объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 1. С. 49—56.
4. *Сороко Л. М.* Гильберт-оптика. М.: Наука, 1981. 160 с.

***Сведения об авторе******Марк Валерьевич Окулов***

- аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: mvokulov@gmail.com

Рекомендована кафедрой лазерной  
техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию  
26.04.13 г.