

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].

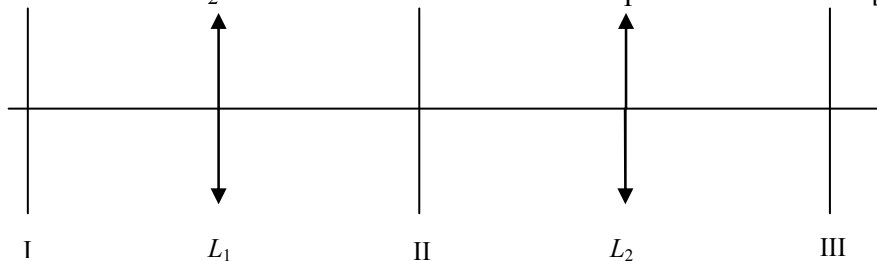


Рис. 1

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 Π , 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.

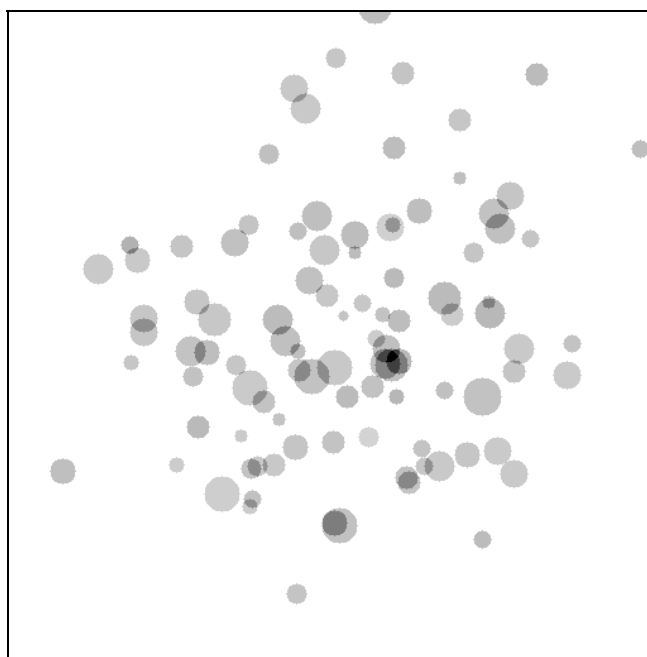


Рис. 2

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 отцентрированного 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.

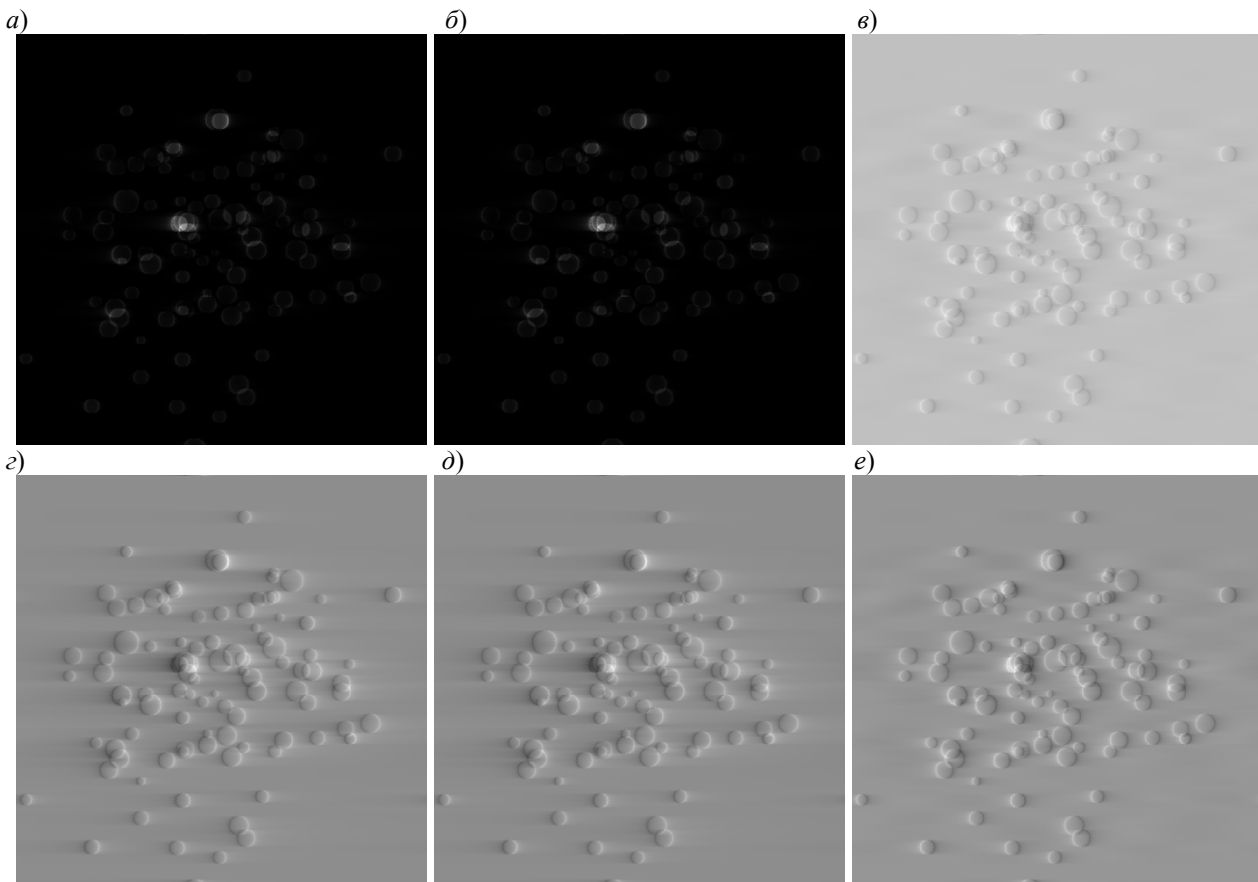


Рис. 3

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 (Δ) 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.

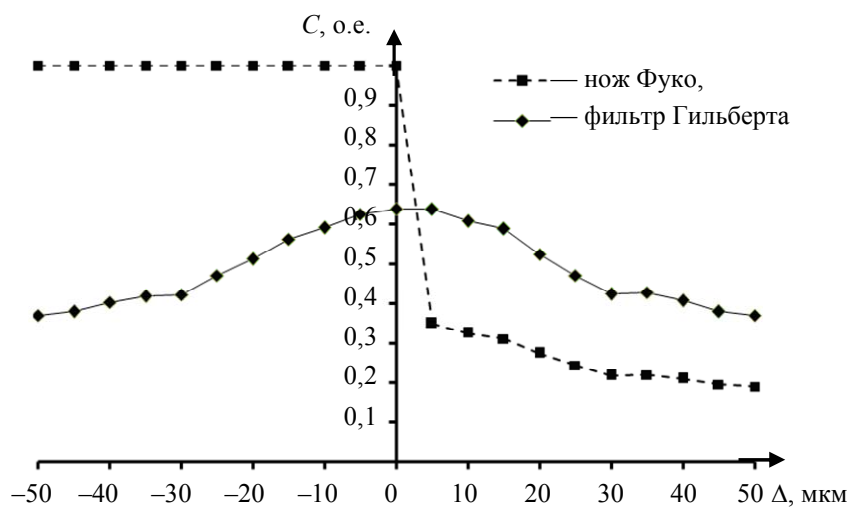


Рис. 4

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.

Марк Валерьевич Окулов

Сведения об авторе

- 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.