

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ПРОСТРАНСТВЕННОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ ДИФРАКЦИОННОГО СПЕКЛ-МОДУЛИРОВАННОГО ПОЛЯ

Б.Б. Горбатенко<sup>1,3</sup>, Л.А. Максимова<sup>2,3</sup>, В.П. Рябухо<sup>2,3</sup>, Ю.В. Норов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет, Саратов, Россия,

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет, Саратов, Россия,

<sup>3</sup>Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия

### Аннотация

Рассматриваются физические механизмы записи и восстановления информации об амплитудно-фазовой структуре оптического поля в голографическом процессе. Обсуждаются способ создания голограммноподобной структуры и способ восстановления изображения по записи интенсивности спекл-модулированного дифракционного поля рассеивающего объекта без опорного пучка. Анализируются результаты натуральных, численных экспериментов и численного моделирования процессов синтеза голограммноподобной структуры и восстановления изображения плоских рассеивающих объектов симметричной и несимметричной форм.

### Введение

Восстановление изображения объекта по зарегистрированному в дифракционной зоне распределению интенсивности рассеянного когерентного поля представляет интерес в голографии и дифракционной оптике, в оптических измерениях и диагностике, в оптических методах и устройствах записи и обработки информации, в когерентной микроскопии и т. д. [1-3]. Основная проблема решения этой задачи состоит в том, что при регистрации пространственного распределения интенсивности без использования когерентного опорного пучка теряется информация о пространственном распределении фазы объектного поля. Поэтому задача восстановления изображения объекта по записи интенсивности дифракционного поля с математической точки зрения является некорректной [1-2]. Решение этой задачи сводится к нахождению способа реконструкции фазы дифракционного поля при записи интенсивности. Известны разные подходы к решению этой проблемы [4-13].

В [14-18] показано, что для плоских рассеивающих объектов распределение интенсивности, по поверхности которых описывается четной функцией координат, или, другими словами, для объектов, обладающих вращательной симметрией четного порядка, требуемое восстановление пространственного распределения фазы дифракционного поля может быть получено достаточно простым способом. Если поверхность такого объекта служит источником  $\delta$ -коррелированного диффузно-рассеянного когерентного излучения, то в дальней зоне дифракции формируется спекл-модулированное поле с бинарным пространственным распределением фазы – в пределах каждого спекла фаза постоянна, а при переходе к соседнему спеклу фаза меняется на  $\pi$  радиан [14, 15].

Данное обстоятельство определяет простой закон пространственного распределения фазы дифракционного поля и, следовательно, простую процедуру реконструкции этого фазового распределения. Следующим шагом будет простой алгоритм восстановления изображения объекта по записи распределения интенсивности дифракционного поля [16-18].

В настоящей работе представлены результаты детального анализа процессов восстановления изображений по записи спекл-структур дифракционного поля рассеивающих объектов различной формы. Рассматриваются натурные (аналоговые) и компьютерные эксперименты восстановления изображений по записи цифровых Фурье-спеклограмм.

### Голограммная структура

Достоинством голографических методов записи и восстановления информации является полное восстановление информации об амплитудно-фазовом распределении объектного поля. Голограммную структуру, – зарегистрированную картину интерференции объектной и опорной волн, обычно представляют в виде суперпозиции синусоидальных дифракционных решеток или зонных структур Френеля [19, 20].

Такие представления с формальной точки зрения позволяют вполне адекватно описать процессы записи и восстановления волнового поля в голографии. Однако реальная голограммная структура, фактически, представляет собой то, что можно увидеть при ее микроскопическом исследовании (рис. 1): набор элементарных дифракционных ячеек, которыми являются спеклы объектного поля, промодулированные несущими интерференционными полосами. При переходе от спекла к спеклу интерференционные полосы смещаются, поскольку фаза поля в спеклах разная. Контраст интерференционных полос определяется соотношением амплитуд объектной и опорной волн в каждом спекле. Следовательно, амплитуда объектного поля кодируется значением контраста интерференционных полос, а фаза – их пространственным положением. Поперечные размеры спеклов определяются шириной углового (пространственного) спектра объектного поля.

Восстанавливаемое с голограммы объектное волновое поле представляет собой суперпозицию элементарных волн, дифрагированных на элементарных дифракционных ячейках голограммы. Такие элементарные дифракционные решетки отчетливо прослеживаются на рис. 1, на котором представлен

сильно увеличенный фрагмент реальной голограммной структуры рассеивающего объекта.

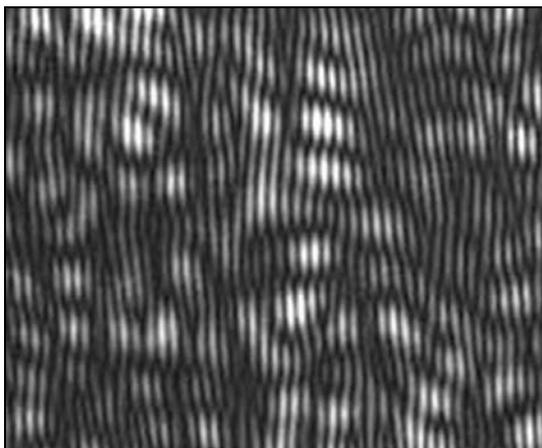


Рис. 1. Фрагмент голограммной структуры рассеивающего объекта

Пространственное положение интерференционных полос внутри элементарной ячейки и положение самой ячейки в плоскости голограммы определяют фазу дифрагированной элементарной волны, а период полос – направление распространения элементарной волны, дифрагированной на данной ячейке. Глубина модуляции дифракционной структуры, зависящая от контраста несущих интерференционных полос, определяет дифракционную эффективность элементарной ячейки, а значит, и амплитуду волны, дифрагированной на ней.

Вышеописанный процесс показывает, как с помощью реальной голограммы восстанавливается амплитудно-фазовая структура объектного поля в плоскости голограммы, а значит, и в дифракционном поле. На рис. 2 схематически показан процесс формирования действительного голографического изображения в дифракционном поле в результате суперпозиции элементарных волн, дифрагированных на элементарных дифракционных ячейках голограммы.

Таким образом, реальная голограмма представляет собой сложную дифракционную структуру и состоит из множества элементарных дифракционных решеток, служащих наименьшими информационными ячейками голограммы. При этом пространственное положение этих решеток на голограмме полностью определяется спекл-структурой объектного поля. Полное волновое поле, восстановленное с голограммы, формируется в результате суперпозиции всех элементарных волн, дифрагировавших на ячейках.

Вышеуказанные особенности дифракционной структуры голограммы предопределяют простой способ синтеза голограммы по записи интенсивности объектного дифракционного поля без использования опорного пучка света. В каждом спекле записанной структуры необходимо тем или иным способом создать несущие полосы с относительным сдвигом, соответствующим фазе поля в этом спекле.

Такая процедура восстановления изображения обсуждается в [16-18]. Она основана на записи спеклограммы рассеивающего объекта в дальнем поле дифракции – Фурье-спеклограммы и на бинарном распределении фазы в спеклах этого поля для объектов симметричной формы.

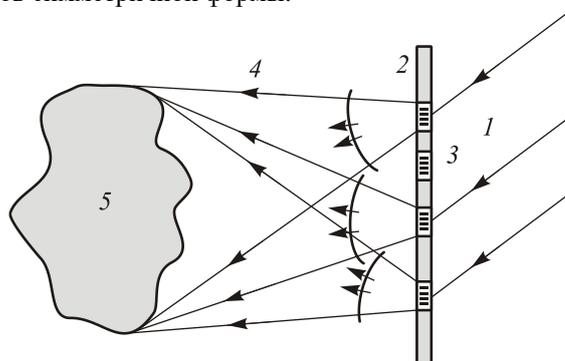


Рис. 2. Схематическое представление процесса восстановления с голограммы действительного изображения объекта при использовании пучка света, сопряженного опорному:  
1 – восстанавливающая волна; 2 – голограмма;  
3 – элементарные дифракционные ячейки;  
4 – элементарные волны, дифрагирующие на элементарных ячейках;  
5 – действительное изображение объекта

#### Схемы записи цифровых Фурье-спеклограмм

Для практического решения задачи восстановления изображения по распределению интенсивности дифракционного поля необходимо зарегистрировать цифровую спеклограмму в дальней зоне дифракции. Для записи цифровых спеклограмм нужно, чтобы регистрируемая спекл-структура уверенно разрешалась ПЗС-матрицей – размеры спеклов должны в несколько раз превышать размеры пикселей ПЗС-матрицы. При использовании Фурье-преобразующей линзы для записи Фурье-спеклограммы это достигается путем уменьшения размера объекта – источника спекл-модулированного поля с использованием линзы с достаточно большим фокусным расстоянием  $f$ . Наименьший поперечный размер спеклов в этом случае определяется соотношением [21]

$$\varepsilon_{\perp} \approx \frac{\lambda f}{d_0}, \quad (1)$$

где  $d_0$  – наибольший размер апертуры объекта – источника спекл-поля.

В экспериментах по записи безлинзовой Фурье-спеклограммы это достигается путем увеличения расстояния от рассеивающего объекта до плоскости регистрации и уменьшения размеров объекта. В этом случае размер спеклов определяется расстоянием  $z$  от объекта до плоскости регистрации

$$\varepsilon_{\perp} \approx \frac{\lambda z}{d_0}. \quad (2)$$

Оптические схемы записи линзовой и безлинзовой Фурье-спеклограмм представлены на рис. 3. В безлинзовой схеме записи для более точного выполнения условия дальнего поля дифракции и выполнения Фурье-преобразования объектного поля необходимо использовать квазисферическую освещающую волну, сходящуюся в плоскости регистрации (рис. 3б). В этих схемах записи цифровых Фурье-спеклограмм предполагается использование цифровых фотокамер с открытой ПЗС-матрицей.

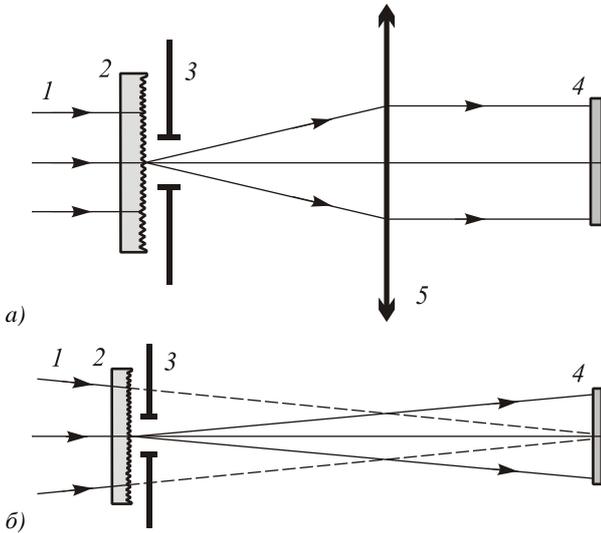


Рис. 3. Схемы записи линзовой (а) и безлинзовой (б) Фурье-спеклограмм рассеивающего объекта: 1 – освещающий лазерный пучок; 2 – рассеиватель; 3 – апертурная диафрагма (транспарант); 4 – ПЗС-матрица; 5 – линза

При использовании фотокамер с несъемным объективом, этот объектив можно применять в качестве Фурье-преобразующей оптической системы (рис. 3а). Однако, в силу малого, как правило, фокусного расстояния фотографических объективов, регистрируемый объект должен иметь достаточно малые размеры для формирования на ПЗС-матрице разрешаемых спеклов. Например, для объектива с  $f \approx 100 \text{ мм}$ , размер объекта  $d_0$  должен быть  $d_0 < \lambda \cdot f / \epsilon_{\perp} \approx 4 \text{ мм}$  при использовании ПЗС-матрицы с 8 мкм размерами пикселей.

Для регистрации Фурье-спеклограмм с несъемным объективом возможно использование специальных оптических схем с дополнительным рассеивающим экраном или с линзой. На рис. 4 и 5 представлены возможные схемы записи таких Фурье-спеклограмм. Лазерный пучок 1 освещает рассеиватель 2 и транспарант 3. Согласно схеме на рис. 4 цифровой фотоаппарат 6 сфокусирован на рассеивающий экран 5, изображение которого формируется на сопряженной плоскости ПЗС-матрицы. Эта схема записи имеет два недостатка. Интенсивность картины изображения падает с расстоянием от центра ПЗС-матрицы из-за ограниченности индикатрисы рассеяния излучения на экране 5. Поскольку в

этой схеме присутствует второй рассеиватель – экран 5, то в плоскости ПЗС-матрицы образуется двойная спекл-структура 7 (рис. 4). Каждый крупный спекл в этой структуре оказывается промодулированным более мелкими спеклами.

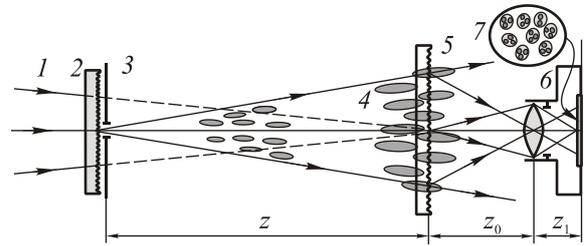


Рис. 4. Схема регистрации спеклограммы с помощью цифрового фотоаппарата с несъемным объективом с использованием рассеивающего экрана: 1 – лазерный пучок; 2 – рассеиватель; 3 – транспарант, 4 – продольный разрез спекл-структуры; 5 – рассеивающий экран; 6 – цифровой фотоаппарат с несъемным объективом; 7 – схематический вид спекл-структуры в плоскости ПЗС-матрицы фотоаппарата

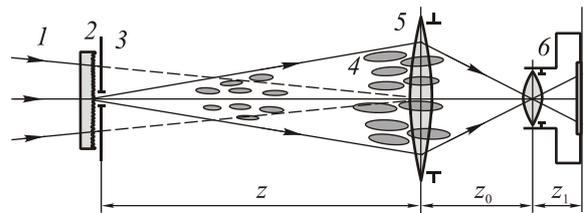


Рис. 5. Схема регистрации Фурье-спеклограммы при использовании коллективной линзы с помощью цифрового фотоаппарата с несъемным объективом: 1 – лазерный пучок; 2 – рассеиватель; 3 – транспарант; 4 – продольный разрез спекл-структуры; 5 – линза; 6 – цифровой фотоаппарат с несъемным объективом

Размер крупных спеклов определяется угловыми размерами апертуры транспаранта 3 и коэффициентом увеличения объектива фотоаппарата  $\beta = z_1 / z_0$ .

$$\epsilon_{\perp} \approx \frac{\lambda \cdot z_1}{\theta \cdot z_0}, \tag{3}$$

где  $\theta \approx d_0 / z$  – угол, под которым наблюдается источник излучения в плоскости экрана;  $z_0$  – расстояние от рассеивающей поверхности рассеивателя 5 до объектива (передней главной плоскости) фотоаппарата 6,  $z_1$  – расстояние от объектива до ПЗС-матрицы.

Размер мелких спеклов, которыми промодулированы крупные спеклы, определяется формулой

$$\epsilon_{0\perp} \approx \frac{\lambda \cdot z_1}{d_a}, \tag{4}$$

где  $d_a$  – диаметр апертуры объектива фотоаппарата.

Чтобы исключить модулирование спеклов спеклами и увеличить равномерность распределения средней интенсивности спекл-структуры в плоско-

сти ПЗС-матрицы в схеме на рис. 4 можно заменить рассеиватель 5 на коллективную линзу 5. Такая схема представлена на рис. 5. Фотоаппарат 6 сфокусирован на плоскость апертуры линзы, которая в этом случае оптически сопряжена с плоскостью ПЗС-матрицы фотоаппарата. Линза 5 собирает рассеянное лазерное излучение и перенаправляет его в объектив (изображение источника спекл-поля формируется в плоскости апертуры диафрагмы объектива). Изображение поперечного сечения спекл-структуры в плоскости линзы отображается на ПЗС-матрице фотоаппарата.

Цифровое изображение спекл-структуры, создаваемой источником в форме кольца, зарегистрированной с помощью схемы на рис. 5, представлено на рис. 6.

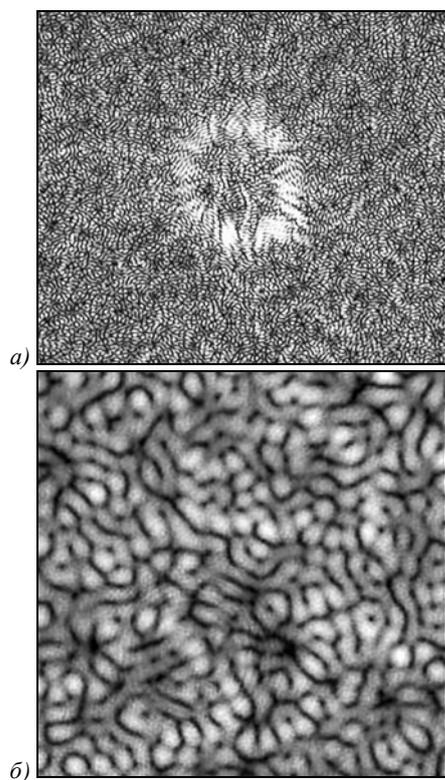


Рис. 6. Цифровое изображение спекл-структуры, полученное в дальней области дифракции с использованием коллективной линзы (рис. 5) (а); увеличенный фрагмент изображения (б)

Кольцевая область с повышенной интенсивностью на рис. 6а обусловлена проявлением нерассеянной компоненты лазерного излучения, прошедшей через рассеиватель 2 (рис. 5). Размер спеклов в плоскости ПЗС-матрицы в этом случае определяется по формуле (3).

#### Дифракция дальнего поля на амплитудной Фурье-спеклограмме (Фурье-образ Фурье-спеклограммы)

Пространственное распределение интенсивности объектного дифракционного поля несет частичную информацию об изображении объекта. Для рассеи-

вающего объекта отдельные спеклы дифракционного поля при голографической регистрации служат элементарными дифракционными ячейками, несущими информацию о фазе и амплитуде объектной волны. В отсутствии опорной волны эти информационные ячейки утрачивают фазовую информацию и, как следствие, утрачивается возможность восстановления полной информации о волновом поле и изображении объекта.

На рис. 7 представлены примеры Фурье-образов Фурье-спеклограмм рассеивающих объектов различной формы. Нетрудно видеть соответствие дифракционных картин автокорреляционным распределениям средней интенсивности поля в плоскости объекта.

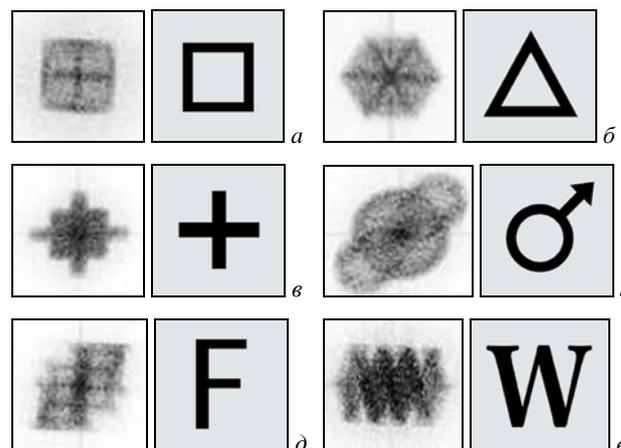


Рис. 7. Фурье-образы Фурье-спеклограмм рассеивающих объектов различной формы: кольцевого квадрата (а); кольцевого треугольника (б); креста (в); астрономического знака Марса (г); буквы F (д); буквы W (е)

Формальный анализ, численные и экспериментальные результаты показывают, что при записи амплитудной Фурье-спеклограммы картина дифракции дальнего поля на такой спеклограмме отображает автокорреляцию распределения интенсивности поля в плоскости объекта. Аналогично, при цифровой записи Фурье-спеклограммы ее Фурье-образ отображает автокорреляцию распределения интенсивности поля в плоскости объекта.

#### Восстановление фазовой информации по спеклограмме

В [14,15] теоретически и экспериментально показано, что для  $\delta$ -коррелированных рассеивающих объектов с осесимметричным распределением интенсивности  $I(x_0, y_0)$  разность фаз поля в дальней области дифракции в соседних спеклах с наибольшей вероятностью равна  $\pi$  радиан. Следовательно, пространственный сдвиг интерференционных полос в соседних спеклах интерференционной структуры Фурье-голограммы на рис. 1 с наибольшей вероятностью равен половине периода полос  $\Lambda$ . Таким

образом, имеем следующий алгоритм для восстановления фазы объектного поля и, следовательно, для восстановления изображения объекта по зарегистрированной интенсивности дальнего дифракционного поля.

Пусть в эксперименте записывается цифровая Фурье-спеклограмма  $I(\xi, \eta)$  без использования опорного пучка света. Затем, с использованием графических цифровых технологий в этом распределении интенсивности в пределах спеклов наносятся искусственные интерференционные полосы с некоторым периодом  $\Lambda$ . При этом, тем или иным способом, обеспечивается сдвиг полос на полпериода  $\Lambda$  при переходе от одного спекла к соседнему. Этим сдвигом полос восстанавливается информация о фазовом пространственном распределении в объектном поле. Фурье-преобразование искусственной голограммы, полученной вышеописанным способом, должно привести к формированию изображения объекта.

На рис. 8 приведен результат численного Фурье-преобразования цифровых Фурье-спеклограмм объектов, имеющих осевую симметрию в распределении средней интенсивности  $I(x_0, y_0)$  (крест (рис. 8б), квадрат (рис. 8в), эллипс (рис. 8г)). Для сравнения на рис. 8а приведен результат численного Фурье-преобразования цифровой Фурье-голограммы, полученной с использованием опорного пучка света.

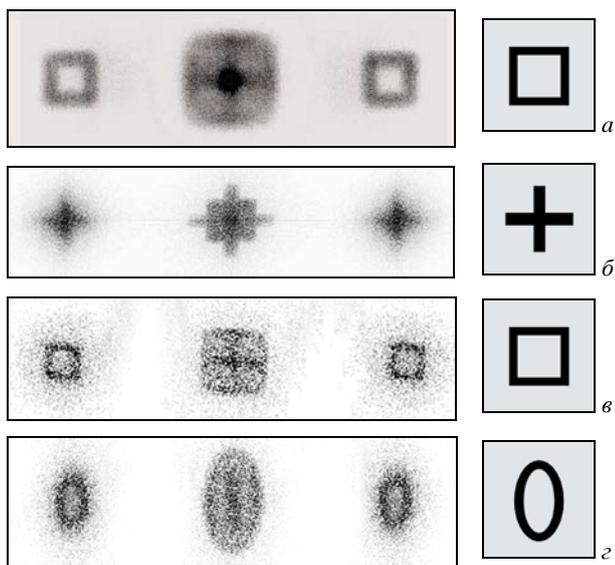


Рис. 8. Картины дифракции дальнего поля, получаемые при численном Фурье-преобразовании цифровой Фурье-голограммы (а) и безопорных цифровых Фурье-спеклограмм с искусственно нанесенными системами несущих интерференционных полос и соответствующие объекты-транспаранты (б-г)

В экспериментах использовалась ПЗС-камера с размером матрицы  $1360 \times 1024$  пикселей ( $6,3 \times 4,8$  мм). Графической обработке подвергались приблизительно 2000 спеклов с помощью программы обработки изображений, позволяющей в ручном режиме

наносить картины несущих полос в спеклах с требуемым сдвигом. Пользователь этой программы вручную применял бинарную цветовую гамму (красный и зеленый цвета) для определения фазы объектного поля в спеклах: красный цвет – 0 рад, зеленый –  $\pi$  рад. Затем программа автоматически определяла и наносила систему несущих интерференционных полос заданного периода  $\Lambda$  во всех отмеченных спеклах. После этого выполнялось Фурье-преобразование от числового файла, соответствующего полученному графическому файлу.

Изображения, приведенные на рис. 8, убедительно показывают эффективность вышеописанного цифрового алгоритма записи и восстановления изображений. В [16,17] нами показана возможность аналогового процесса восстановления изображения по цифровой Фурье-спеклограмме. В этом случае графический файл, получаемый после компьютерной обработки цифровой Фурье-спеклограммы, с требуемым увеличением распечатывался, а затем, с необходимым уменьшением фотографически переносился на фотопластинку. Таким образом получали голографически подобный дифракционный оптический элемент (ДОО). При освещении такого ДОО лазерным пучком в дальней зоне дифракции наблюдались изображения записанного объекта. Пример такого восстановления изображения приведен на рис. 9.

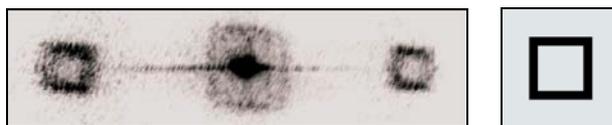


Рис. 9. Картина дифракции лазерного пучка на искусственном голографически подобном дифракционном оптическом элементе

Для сравнения на рис. 10 приведен пример численного Фурье-преобразования цифровой Фурье-спеклограммы эллипса с системой несущих полос без сдвига на половину периода при переходе между соседними спеклами. Как видно из рисунка, распределения интенсивности в первых порядках дифракции не соответствуют изображениям объекта, а представляют собой автокорреляцию распределения поля по объекту, как и в нулевом порядке дифракции.

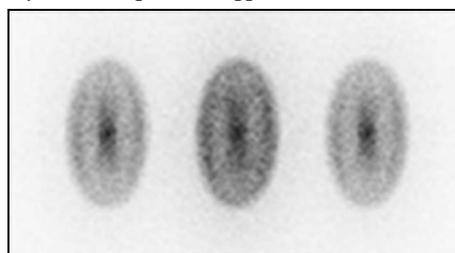


Рис. 10. Картина дифракции дальнего поля, полученная при Фурье-преобразовании спеклограммы эллипса с нанесенной системой несущих полос без сдвига на половину периода между соседними спеклами

Именно сдвиг несущих полос на половину периода при переходе от спекла к спеклу обеспечивает формирование изображений объекта в первых порядках дифракции при Фурье-преобразовании спекл-картины с системой несущих полос.

Вышеописанный способ записи и восстановления изображений применим для объектов с осесимметричным распределением интенсивности  $I(x_0, y_0)$ . Только в этом случае фаза дифракционного поля в различных спеклах с наибольшей вероятностью принимает значения 0 и  $\pi$  рад.

На рис. 11 показан результат численного восстановления изображений с использованием вышеописанного алгоритма для несимметричных объектов в форме букв W, F и треугольника. В дифракционных порядках распределения интенсивностей не соответствуют изображениям объектов. Этим экспериментом подтверждается теоретическое положение о том, что для  $\delta$ -коррелированного источника диффузно-когерентного излучения разность фаз поля в дальней области дифракции в соседних спеклах с наибольшей вероятностью равна  $\pi$  радиан только для центрально-симметричного объекта [15].

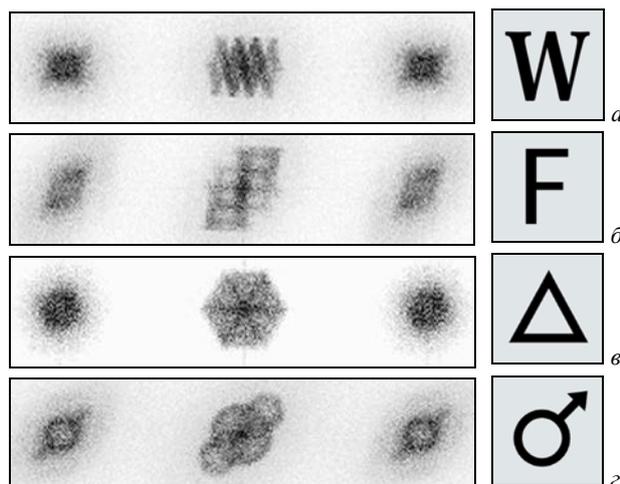


Рис. 11. Распределения интенсивностей, полученные при численном Фурье-преобразовании искусственных Фурье-спеклограмм несимметричных объектов: буква W (а), буква F (б), треугольник (в), объект с незначительным нарушением симметрии (г)

Особый интерес представляет случай записи спеклограммы объекта с незначительным (частичным) нарушением симметрии. На рис. 11г представлен результат восстановления такого объекта. Видно, что в целом предложенный алгоритм позволяет приблизительно восстановить изображение объекта. Однако в восстановленном изображении наблюдается дополнение до симметричного вида – появилась деталь, симметрично расположенная детали, нарушающей симметрию в исходном объекте. Этот эффект пока не нашел у нас объяснения и нуждается в дальнейшем исследовании.

### Численное моделирование

Процесс регистрации спекл-полей требует специального оборудования, поэтому его моделирование на компьютере существенно расширяет возможности исследователя. Спекл-структура, смоделированная на компьютере, представлена на рис. 12.

Для обработки спеклограмм с целью создания голограммоподобных структур с несущими полосами были использованы компьютерные программы обработки спеклов, позволяющие наносить на спеклограмму систему несущих полос со сдвигом на половину периода при переходе от одного спекла к соседнему. Алгоритм восстановления фазового распределения в спекл-поле состоит в следующем:

1. перевод изображения в массив чисел;
2. определение среднего уровня яркости и проведение бинаризации по этому уровню (рис. 13);
3. разделение слипшихся спеклов; светлые пятна, соединенные тонким перешейком, скорее всего, представляют разные спеклы (рис. 14);
4. разделение спекл-картины на соседние области (рис. 15);
5. нанесение на спеклограмму системы несущих полос, сдвинутых на половину периода между соседними спеклами (рис. 16).

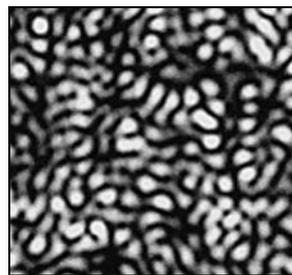


Рис. 12. Спекл-структура, смоделированная на компьютере

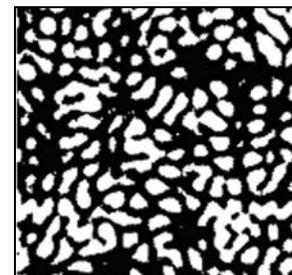


Рис. 13. Бинаризация изображения

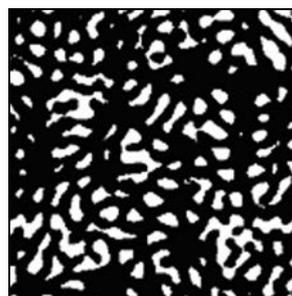


Рис. 14. Разделение слипшихся спеклов

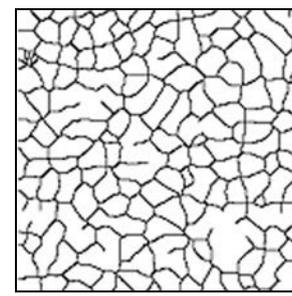


Рис. 15. Области разделения спекл-картины

Восстановленные изображения, полученные с помощью Фурье-преобразования спеклограммы с такой системой несущих полос, представлены на рис. 17. Из рисунка видно, что восстановленные изображения в некоторой степени повторяют форму источника.

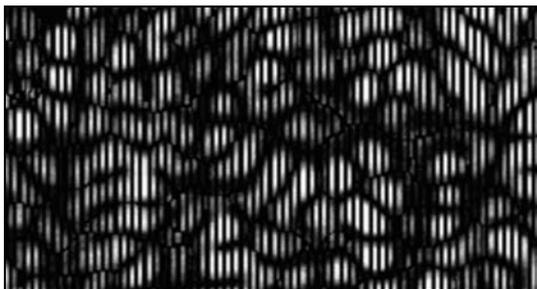


Рис. 16. Спекл-картина с системой несущих полос

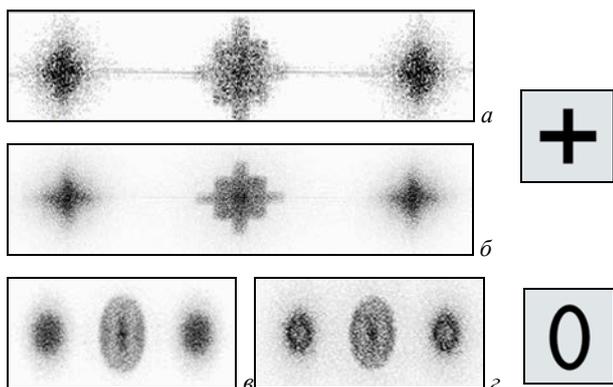


Рис. 17. Восстановленные изображения объектов с четным порядком центральной симметрии: креста (а-б); эллипса (в-г)

На рис. 17а, в представлены восстановленные изображения для случая разделения соседних областей в процессе обработки в автоматическом режиме, на рис. 17б, г – для случая разделения соседних областей в ручном режиме. Сравнение результатов применения этих режимов обработки спеклограмм показывают несколько более высокое качество восстановления изображений при использовании ручного режима определения соседних спеклов с необходимым сдвигом полос. Для повышения качества восстановления изображений автоматическая программа требует дальнейшей доработки в плане более точного определения областей, представляющих соседние спеклы. Как видно из рис. 17, в целом, предложенный алгоритм позволяет приближенно восстанавливать изображения объекта. Графическая обработка спеклограммы с применением специальных программных средств является менее трудоемким процессом по сравнению с ручной обработкой, но она сопровождается существенными ошибками при определении границ спеклов и поэтому требует дальнейшей доработки.

### Заключение

Обсуждаемый в работе метод записи и восстановления изображения базируется на записи интенсивности дифракционного поля рассеивающего объекта при его когерентном освещении. Последнее обстоятельство обеспечивает спекл-модуляцию дифракционного поля, которая несет часть информации об источнике этого поля, иными словами, об изображении объекта. Теряемая при записи интен-

сивности без когерентного опорного пучка фазовая информация в рассматриваемом методе восстанавливается на основе представления о почти бинарном (0 и  $\pi$  рад) пространственном распределении фазы в спекл-модулированном поле в дальней области дифракции для объектов симметричной формы (апертуры). Такое восстановление фазового распределения обеспечивается созданием в записанной спекл-структуре высокочастотной квазипериодической модуляции, аналогичной модуляции несущими интерференционными полосами в голографической записи волнового поля. В итоге, получается квазипериодическая пространственная несущая – система полос, модулированная по амплитуде и фазе спекл-структурой записанного дифракционного поля; спекл-структура выступает в качестве огибающей пространственной несущей. При этом требуемая фазовая модуляция обеспечивается сдвигом несущих полос на половину их периода при переходе от одного спекла к соседнему.

Вышеописанная процедура восстановления амплитудно-фазовой структуры дифракционного поля, как показали натурные и численные эксперименты, обеспечивает восстановление изображения удовлетворительного качества, позволяющее сделать вывод о правильности применяемых подходов. Относительно высокие искажения восстановленного изображения (относительно низкое отношение сигнал/шум) по отношению к голографическому, записанному и восстановленному в тех же условиях, обусловлено, на наш взгляд, следующими недостатками обсуждаемой процедуры восстановления амплитудно-фазового распределения. В первую очередь это то, что фаза 0 и  $\pi$  у соседних спеклов понимается в вероятностном смысле, а не точно. Во вторую очередь следует указать на имеющую место неточность определения соседних спеклов дифракционного поля, в которых должен быть фазовый сдвиг в  $\pi$  радиан и, соответственно, сдвиг несущих полос на половину их периода.

Третья причина относительно высокой зашумленности восстановленных изображений обусловлена использованной нами системой несущих полос с прямоугольным профилем, вместо синусоидального, имеющего место в голографическом процессе. Такой профиль несущей эквивалентен результату нелинейности голографической записи, что сопровождается, как известно, появлением множества дополнительных порядков дифракции, определяющих шумовое гало вокруг восстановленного изображения.

К четвертой причине следует отнести отсутствие модуляции контраста создаваемой несущей системы полос, отвечающего за запись и восстановление амплитуды объектного поля в отдельных его спеклах. В используемой процедуре мы создавали несущую систему полос с единичным контрастом (с единичным коэффициентом модуляции), тогда как в голографической записи контраст несущих полос определяется соотношением интенсивностей опорной и

объектной волн в каждом спекле. Таким образом, в нашей процедуре информация о распределении амплитуды объектного поля восстанавливалась не в полной мере, что приводило, очевидно, к искажению восстановленного изображения. Учет вышеописанных факторов в процедуре восстановления амплитудно-фазовой информации дифракционного поля позволит существенным образом повысить качество (четкость) восстанавливаемых изображений.

Таким образом, в работе показана принципиальная возможность реконструкции фазы спекл-модулированного дифракционного поля симметричного плоского рассеивающего объекта. Показана также возможность восстановления изображений плоских объектов по записи безопорной Фурье-спеклограммы. Экспериментально подтверждена работоспособность предложенного метода восстановления изображения. Реализован вариант цифровой безопорной Фурье-голограммы на основе разработанной методики восстановления изображения объекта по зарегистрированной интенсивности спекл-модулированного дифракционного поля.

Результаты работы позволяют расширить представления о свойствах диффузно-когерентного поля и могут быть использованы для создания новых технологий и подходов в области оптической обработки информации. На основе проведенных исследований возможна разработка новых методов и устройств голографической интерферометрии, спекл-интерферометрии, вычитания изображений для центрально-симметричных объектов, создание специальных дифракционных элементов.

#### *Благодарности*

Авторы благодарят В.В. Лычагова, к.ф.-м.н. О.А. Перепельщину, к.ф.-м.н. Д.В. Лякина за помощь в экспериментальных исследованиях и Д.М. Масленникова за создание программы обработки цифровых изображений. Исследования были проведены при поддержке грантов РФФИ №06-08-00987а и CRDF REC-006.

#### *Литература*

1. Обратные задачи в оптике // Под ред. Болтса Г.П. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с.
2. Гончарский А.В., Попов В.В., Степанов В.В. Введение в компьютерную оптику. – М.: Издательство МГУ, 1991. – 312 с.
3. Компьютеры в оптических исследованиях // Под ред. Б. Фридена – М.: Мир, 1983. – 488 с.
4. Fernández-Guasti M., Jiménez J.L., Granados-Augustín F., Cornejo-Rodríguez A. Amplitude and phase representation of monochromatic fields in physical optics // Journal of the Optical Society of America A, 2003. – V. 20. – P. 1629–1634.
5. Методы компьютерной оптики // Под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
6. Kotlyar V.V., Serafimovich P.G., Soifer V.A. Regularised iterative algorithm for the phase retrieval // Optik, 1993. – V. 94. – P. 96–99.
7. Nitta K., Shogenji R., Miyatake S., Tanida J. Image reconstruction for thin observation module by bound optics by using the iterative back projection method // Applied Optics, 2006. – V. 45. – I. 13. – P. 2893–2901.
8. Wu J. S., Weierstall U., Spence J. C. H., Koch C. T. Iterative phase retrieval without support // Opt. Lett., 2004. – V. 29. – I. 23. – P. 2737–2745.
9. Bates R.H.T., Tan D.G.H. Toward reconstructing phases of inverse-scattering signals // Journal of the Optical Society of America A, 1985. – V. 2. – P. 2013–2019.
10. Вахрушева М.В., Власов Н.Г. Сведение фазовой проблемы к расчету интерферограмм сдвига // Прикладная математика и техническая физика, 2003. – Т. 2. – № 4. – С. 3–4.
11. Vlasov N.G., Sazhin A.V., Kalenkov S.G. Solution of phase problem // Laser Physics, 1996. V. 6(2). P. 401–404.
12. Bastiaans M. J., Wolf K. B. Phase reconstruction from intensity measurements in linear systems. // Journal of the Optical Society of America A, 2003. – V. 20. – P. 1046–1049.
13. Kolenovic E. Correlation between intensity and phase in monochromatic light // Journal of the Optical Society of America A, 2005. – V. 22. – I. 5. – P. 899–906.
14. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Максимова Л.А., Рябухо В.П. Статистические свойства пространственного распределения фазы развитого спекл-поля // Письма в ЖТФ, 1992. – Т. 18. – В. 2. – С. 26–28.
15. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Максимова Л.А., Рябухо В.П. О некоторых статистических свойствах разности фаз в развитом спекл-модулированном поле // Оптика и спектроскопия, 1995. – Т. 78. – В. 2. – С. 316–319.
16. Горбатенко Б.Б., Рябухо В.П., Максимова Л.А. Метод восстановления изображения предмета по спекл-структуре его дифракционного поля // Письма в ЖТФ, 2004. – Т. 30. – В. 17. – С. 68–75.
17. Горбатенко Б.Б., Рябухо В.П., Максимова Л.А. Статистические свойства разности фаз в спекл-модулированном поле и метод восстановления изображения предмета по спекл-структуре его дифракционного поля // Компьютерная оптика, 2004. – В. 26. – С. 48–52.
18. Горбатенко Б.Б., Рябухо В.П., Максимова Л.А. Реконструкция пространственного фазового распределения в дифракционном спекл-поле и восстановление изображения объекта по записи интенсивности // Оптика и спектроскопия, 2006. – Т. 101. – № 5. – С. 861–865.
19. Кольтер Р., Беркхарт К., Лиин Л. Оптическая голография // – М.: Мир, 1973. – 688 с.
20. Шепелевич В.В. Введение в когерентную оптику и голографию // – Минск: Выш.Шк, 1985. – 144 с.
21. Франсон М. Оптика спеклов // – М.: Мир, 1980. – 171 с.

# RECONSTRUCTION OF IMAGE FROM SPATIAL DISTRIBUTION OF INTENSITY OF DIFFRACTION SPECKLE-MODULATED FIELD

B.B. Gorbatenko<sup>1,3</sup>, L.A. Maksimova<sup>2,3</sup>, V.P. Ryabukho<sup>2,3</sup>, Yu.V. Norov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

<sup>2</sup>Saratov State University,

<sup>3</sup>Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS

## Abstract:

The physical mechanisms for data recording and reconstruction about the amplitude-phase structure of the optical field in a holographic process are considered. Method of creating a hologram-like structure and method for reconstruction an image from intensity recording without reference beam of the speckle-modulated diffraction field of the scattering object are discussed. The results of full-scale, numerical experiments and numerical modeling of the processes of synthesis of a hologram-like structure and reconstruction of the image of plane scattering objects of symmetric and asymmetric form are analyzed.

**Keywords:** speckle-modulated diffraction field, image reconstruction, hologram-like structure

**Citation:** Gorbatenko BB, Maksimova LA, Ryabukho VP, Norov YuV. Reconstruction of image from spatial distribution of intensity of diffraction speckle-modulated field [In Russian]. Computer Optics 2007; 31(2): 26-33.

**Acknowledgements:** The authors thank V.V. Lychagov, Ph.D. (Physics and Mathematics) O.A. Perepelytsyna, Ph.D. (Physics and Mathematics) D.V. Lyakin (Physics and Mathematics) for their assistance in experimental research and D.M. Maslennikov for the development of the digital image processing program. The research was partly supported by the RFBR grants Nos. 06-08-00987a and CRDF REC-006.

## References:

- [1] Baltes HP (ed.), et al. Inverse Scattering problems in Optics. Berlin: "Springer-Verlag" Publisher, 1980; 313 p.
- [2] Goncharky AV, Popov VV, Stepanov VV. Introduction to computer optics [In Russian]. Moscow: MSU Publisher, 1991; 312 p.
- [3] Frieden B (ed.), et al. The computer in optical research. Berlin: "Springer-Verlag" Publisher, 1980; 371 p.
- [4] Fernández-Guasti M, Jiménez JL, GranadosAugustín F, Cornejo-Rodríguez A. Amplitude and phase representation of monochromatic fields in physical optics. Journal of the Optical Society of America A 2003; 20: 1629–1634.
- [5] Volkov AV, Golovashkin DL, Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Kotlyar VV, Pavelyev VS, Skidanov RV, Soifer VA (ed.), Solovjev VS, Usplenyev GV, Kharitonov SI, Khonina SN. Methods of Computer Optics [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2000; 688 p.
- [6] Kotlyar VV, Serafimovich PG, Soifer VA. Regularised iterative algorithm for the phase retrieval. Optik 1993; 94: 96-99.
- [7] Nitta K, Shogenji R, Miyatake S, Tanida J. Image reconstruction for by using the iterative back projection method. Applied Optics 2006; 45(13): 2893-2902
- [8] Wu JS, Weierstall U, Spence JCH, Koch CT. Iterative phase retrieval without support. Opt. Lett. 2004; 29(23): 2737-2745.
- [9] Bates RHT, Tan DGH. Toward reconstructing phases of inverse-scattering sign. Journal of the Optical Society of America A 1985; 2: 2013-2019.
- [10] Vakhrusheva MV, Vlasov NG. Reduction of a phase problem to calculating shear interferograms [In Russian]. Applied Mathematics and Physics 2003; 2(4): 3-4.
- [11] Vlasov NG, Sazhin AV, Kalenkov SG. Solution of phase problem. Laser Physics 1996; 6(2): 401-404.
- [12] Bastiaans MJ, Wolf KB. Phase reconstruction from intensity measurements in linear systems. Journal of Society of America A 2003; 20: 1046–1049.
- [13] Kolenovic E. Correlation between intensity and phase in monochromatic light. Journal of the America A 2005; 22(5): 899-906.
- [14] Gorbatenko BB, Klimenko IS, Maksimova LA, Ryabukho VP. Statistical properties of spatial phase distribution in developed speckle-field [In Russian]. Technical Physics Letters 1992; 18(2): 26-28.
- [15] Gorbatenko BB, Klimenko IS, Maksimova LA, Ryabukho VP. On several statistical properties of phase difference in developed speckle-modulated field. Optics and Spectroscopy 1995; 78(2): 283-286.
- [16] Gorbatenko BB, Ryabukho VP, Maksimova LA. Reconstructing an object image using the laser speckle pattern of the diffraction field. Technical Physics Letters 2004; 30(9): 741-743.
- [17] Gorbatenko BB, Ryabukho VP, Maksimova LA. Statistical properties of spatial phase distribution in developed speckle-field and reconstructing an object image using the laser speckle pattern of the diffraction field [In Russian]. Computer Optics 2004; 26: 48-52.
- [18] Gorbatenko BB, Ryabukho VP, Maksimova LA. Reconstruction of spatial phase distribution in diffraction speckle-field and reconstructing an object image from speckle intensity. Optics and Spectroscopy 2006; 101(5): 811–815.
- [19] Collier RJ, Burckhart CB, Lin LH. Optical holography. New York; London: "Academic Press" Publisher, 1971; 688 p
- [20] Shepelevich VV. Introduction to coherent optics and holography [In Russian]. Minsk: "Vysshaya shkola" Publisher, 144 p.
- [21] Franson M. La granularite laser (spekle) et ses applications en optique. Masson Paris New York Barcelone Milan, 1978; 171 p.