
Оптика

УДК 535.4

Запись и численное восстановление цифровых голограмм Френеля

С. Н. Стариков, П. А. Черёмхин, В. В. Краснов

*Кафедра лазерной физики
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31*

Рассмотрена схема записи цифровых голограмм Френеля с внесевым объектным пучком, получены расчётные оценки предельных параметров регистрируемых объектов. По результатам анализа создана экспериментальная установка, записаны цифровые голограммы Френеля в режимах освещения объектов «на просвет» и «на отражение». Полученные голограммы численно восстановлены, выполнено сравнение расчётных и экспериментальных значений параметров.

Ключевые слова: цифровая голография, голограмма Френеля.

1. Введение

Понятие «цифровая голография» включает в себя регистрацию интерференционной картины от объектной и опорной волн на цифровой фоторегистратор в виде матрицы чисел, методы математической реконструкции и преобразования зарегистрированных волновых полей, а также цифровую пост-обработку голограмм перед их использованием. Полученная таким образом голограмма называется «цифровой голограммой» [1]. Основы цифровой голографии (численное восстановление голограмм) были заложены в 70-е гг. [2, 3]: голограмма записывалась обычным образом на фотографическую пластинку, затем оцифровывалась и численно восстанавливалась. Важнейшим шагом в развитии цифровой голографии явился эксперимент по записи голограмм Френеля непосредственно на ПЗС-матрицу фотоприёмника [4] в 1993 г. С этого времени стало возможным записывать и обрабатывать цифровые голограммы без промежуточного процесса в виде записи на фоторегистрирующую среду.

Среди достоинств цифровых голограмм в сравнении с обычными стоит отметить:

1. Возможность обработки голограммы, в том числе подавление шумов, а также математических преобразований над ней.
2. Возможность вычисления амплитуды и фазы зарегистрированной волны непосредственно с цифровой голограммы и количественных оценок характеристик поля.
3. Возможность математической реконструкции зарегистрированного светового поля и его преобразования.
4. Возможность многократного использования (оперативного «тиражирования») голограмм и передача их по каналам связи, в том числе в реальном масштабе времени.

Слабой стороной цифровых голограмм является ограниченность их по числу элементов и разрешению из-за соответствующих ограничений фотоприёмников.

Для наиболее полного использования возможностей цифровых голограмм Френеля важна оценка предельных параметров голографируемых объёмных сцен в зависимости от характеристик цифрового фоторегистратора. В работе получены

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2011 г.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Авторы выражают благодарность с.н.с. НИЯУ МИФИ Родину В.Г. за помощь и ценные обсуждения при подготовке и проведении этой работы.

расчётные предельные количественные оценки параметров регистрируемых объектов для схемы записи цифровых голограмм Френеля с внеосевым объектным пучком. По результатам анализа создана экспериментальная установка, записаны цифровые голограммы Френеля в режимах освещения объектов «на просвет» и «на отражение». Полученные голограммы численно восстановлены, выполнено сравнение расчётных и экспериментальных значений параметров голографируемых сцен.

2. Оценки предельных параметров голографируемых объектов при записи цифровых голограмм Френеля с внеосевым объектным пучком

Существуют две основные схемы записи цифровых голограмм Френеля (т.е. записанных в области дифракции Френеля): с внеосевым опорным пучком и осевым опорным пучком, которая представлена только в цифровой голографии [5]. Схема записи с внеосевым опорным пучком аналогична той, что применяется в оптической голографии, только регистрация интерференционной картины производится на матричный цифровой фоторегистратор [1]. Восстановление изображения с записанных цифровых голограмм производится численно с помощью компьютера, либо оптически (по результатам вывода цифровой голограммы на физический носитель).

Предельные значения параметров голографируемой объёмной сцены определяются характеристиками цифрового регистратора голограмм и длиной волны излучения. В качестве оцениваемых параметров были выбраны максимальный поперечный размер голографируемого объекта L и размер элемента разрешения объекта Δx , которые определяют число отсчётов на объекте $M = L/\Delta x$ в поперечном направлении. Исходными параметрами являлись размер элемента разрешения голограммы Δh (размер пикселя фоторегистратора), число отсчётов голограммы $N_1 \times N_2$, расстояние от голограммы до ближайшей точки объекта z , длина волны излучения Δh . Размер поля восстановления R , число отсчётов поля восстановления P и размер элемента разрешения поля восстановления Δu с учётом дифракции определяются следующими выражениями (формулы приведены для $N_1 = N_2 = N$) [4]:

$$R = \frac{\lambda \cdot z}{\Delta h}, P = N, \Delta u = \frac{\lambda \cdot z}{N \cdot \Delta h}. \quad (1)$$

В связи с тем, что на поле восстановления присутствуют три порядка дифракции («+1», «0» и «-1»), налагается дополнительное условие на размер и положение объекта: необходимо, чтобы «+1» порядок дифракции (изображение объекта) не пересекался с «0» и «-1». Далее считаем, что «0» порядок дифракции расположен по центру поля восстановления, что соответствует перпендикулярному падению опорной волны на матрицу фотоприёмника. Следует отметить, что с учётом дифракции размер области на поле восстановления, которую занимает «-1» дифракционный порядок больше, чем область, занимаемая «+1» порядком. Если «+1» и «-1» порядки дифракции должны целиком находиться по разные стороны от положения «0» порядка на поле восстановления, то налагаются ограничения на характеристики объекта с недопущением циклического сдвига (НЦС) положения части «-1» порядка дифракции. В случае, когда «-1» порядок дифракции может быть расположен по обе стороны от «0» порядка на поле восстановления (но при этом не пересекается с «+1»), налагаются ограничения на характеристики объекта с допущением циклического сдвига (ДЦС) положения части «-1» порядка дифракции. Случай с ДЦС «-1» порядка дифракции позволяет регистрировать объекты с большим размером в сравнении с ограничением с НЦС. Однако, например, при автоматической обработке изображений часто требуется раздельное отображение положений «+1» и «-1» порядков дифракции относительно «0». Поэтому

в данной работе при записи и восстановлении цифровых голограмм рассматриваются и применяются оба ограничения. Путём оценки допустимых положений порядков дифракции получены ограничения на предельные значения параметров голографируемой объёмной сцены при записи цифровых голограмм Френеля с внеосевым объектным пучком для случаев с НЦС (2) и ДЦС (3) «-1» порядка дифракции (формулы приведены для $N_1 = N_2 = N$):

$$L \leq \frac{\lambda \cdot z}{2 \cdot \Delta h} - \frac{3}{2} N \cdot \Delta h, M \leq \frac{N}{2} \left(1 - 3 \frac{N \cdot (\Delta h)^2}{\lambda \cdot z} \right), \Delta x = \frac{\lambda \cdot z}{N \cdot \Delta h}. \quad (2)$$

$$L \leq \frac{\lambda \cdot z}{2 \cdot \Delta h} - N \cdot \Delta h, M \leq \frac{N}{2} \left(1 - 2 \frac{N \cdot (\Delta h)^2}{\lambda \cdot z} \right), \Delta x = \frac{\lambda \cdot z}{N \cdot \Delta h}. \quad (3)$$

Используя полученные соотношения, были построены зависимости максимального числа отсчётов объекта в поперечном направлении (рис. 1а), максимального поперечного размера объекта (рис. 1б), минимального разрешаемого элемента объекта (рис. 1в) от расстояния между голограммой и ближайшей к голограмме точке объекта. На графиках расстояние z нормировано на $z_{min} = 2 \frac{N \cdot (\Delta h)^2}{\lambda}$. Расстояние z_{min} соответствует минимальному расстоянию z , при котором на данную голограмму может быть зарегистрирован объект, состоящий из одного отсчёта.

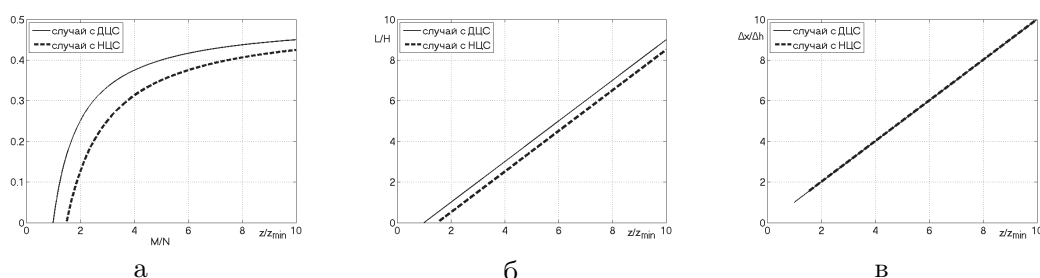


Рис. 1. Графики зависимости (в нормированных координатах) максимального числа отсчётов объекта от расстояния между голограммой и ближайшей к ней точке объекта: (а) в поперечном направлении; (б) максимального поперечного размера объекта, (в) минимального разрешаемого элемента объекта

Как видно из рис. 1, для случая с ДЦС части «-1» порядка дифракции минимальная величина расстояния z в 1,5 раза меньше, чем для случая с НЦС. При увеличении z максимальное число отсчётов в поперечном направлении для обоих случаев может достигать половины числа отсчётов голограммы. Максимальный поперечный размер объекта в случае с ДЦС всегда на половину размера голограммы больше, чем для случая с НЦС.

Полученные оценки были использованы и проверены при регистрации цифровых голограмм на экспериментальной установке и их численном восстановлении.

3. Эксперименты по записи и численному восстановлению цифровых голограмм Френеля

3.1. Экспериментальная установка для записи цифровых голограмм Френеля с внеосевым объектным пучком

Схема созданной экспериментальной установки для записи цифровых голограмм Френеля представлена на рис. 2. Источником излучения является твердотельный лазер с диодной накачкой мощностью 50 мВт с длиной волны 532 нм

и длиной когерентности 50 м. Пучок лазера с помощью коллиматора, состоящего из микрообъектива, фильтрующей диафрагмы и коллимирующего объектива, расширяется до размера примерно 40 мм в диаметре. С помощью зеркала 1 пучок направляется на делительную призму для разделения на объектный и опорный пучки. Часть пучка, отражённая от передней грани делительной призмы, является опорным пучком. Опорный пучок, отражаясь от зеркала 2, проходит через поляризаторы 1 и 2, отражается от диагональной грани делительного куба и попадает на матрицу цифрового фоторегистратора. Поляризаторы 1 и 2 используются для уравнивания интенсивностей опорного и объектного пучков. Схема установки позволяет записывать голограммы объектов как в режиме «на просвет» (в этом случае, объектный пучок, отражаясь от зеркал 4 и 3, просвечивает объект перед попаданием на матрицу фоторегистратора), так и «на отражение» (поворотом зеркала 4 объектный пучок направляется на объект и рассеивается им в направлении матрицы фоторегистратора). Затвор и зеркало 5 позволяют контролировать угол между объектным и опорным пучками, а также границы допустимых положений объекта. Для этого перед регистрацией голограммы открывается затвор, и часть опорного пучка, прошедшая через делительный куб, отражается от зеркала 5 так, что после отражения от делительного куба её направление противоположно направлению опорного пучка, падающего на фоторегистратор.

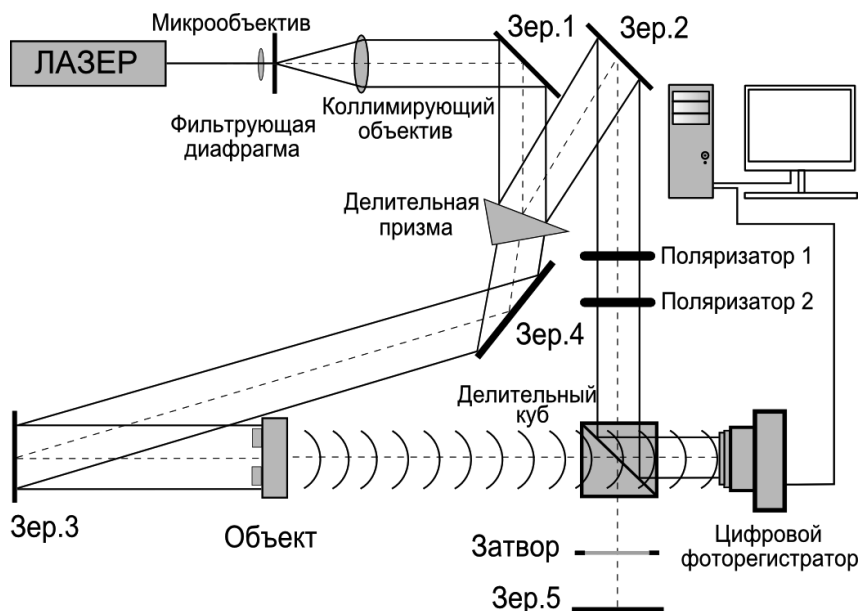


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по записи цифровых голограмм Френеля в режиме «на просвет»

В качестве регистратора цифровых голограмм использовалась камера Megaplus II ES11000, имеющая следующие характеристики: количество пикселей — 4008×2672 , размер пикселя — $9\text{мкм} \times 9\text{мкм}$, разрядность АЦП — 8, 10, 12 бит, максимальная частота съёмки полного кадра — 3 Гц, диапазон возможных значений времён экспозиции — $0,14 \div 10000\text{мс}$. Компьютер использовался для управления камерой, сохранения цифровых голограмм, их обработки и численного восстановления.

Диапазон возможных значений расстояний от объекта до голограммы составляет $200 \div 1400\text{мм}$. Поперечный размер голографируемых объектов — до 23 мм. Максимальный размер регистрируемой интерференционной картины — $21\text{мм} \times 24\text{мм}$.

3.2. Условия проведения экспериментов и определение расстояния от объекта до голограммы по численно восстановленным изображениям

В ходе экспериментов на описанной установке выполнялась запись цифровых голограмм в режимах освещения объектов «на просвет» и «на отражение». Количество отсчётов в голограммах составляло от 512×512 до 2048×2048 . Диапазон используемых значений расстояний от объекта до голограммы варьировался в пределах $700 \div 1400$ мм. Период полос регистрируемых интерференционных картин составлял $3 \div 5$ отсчётов голограммы ($27 \div 45$ мкм). На рис. 3 приведён фрагмент размером 256×256 отсчётов одной из зарегистрированных цифровых голограмм.

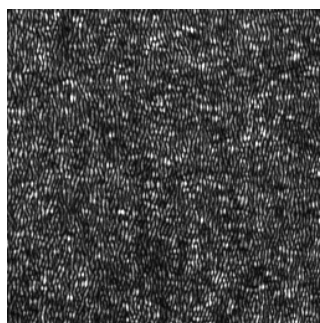


Рис. 3. Фрагмент записанной цифровой голограммы

Для численного восстановления записанных цифровых голограмм использовался метод прямого расчёта дифракции Френеля [1, 6]. Для всех записанных голограмм восстановление производилось при различных значениях расстояний z , в том числе и для реальных, использовавшихся при записи голограмм. При уменьшении или увеличении расстояния от значения, при котором произведена регистрация голограмм, восстановленные изображения объектов становились нерезкими. Например, на рис. 4а-в приведены результаты численного восстановления цифровой голограммы с числом отсчётов 512×512 при различных значениях расстояния z . На голограмме записано контурное изображение самолёта в режиме «на просвет».

На полученных при различных значениях расстояния z численно восстановленных изображениях видны три («+1», «0» и «-1») порядка дифракции. Измеренное значение удалённости объекта от голограммы z составило 900 ± 5 мм, а по резкости восстановленных изображений — 900 ± 30 мм. Как видно, полученные величины согласуются друг с другом.

Данная цифровая голограмма была бинаризована и численно восстановлена. Восстановленное изображение приведено на рис. 4г. Разница в численно восстановленных изображениях объекта (рис. 4а, г) визуально незначительна, а их нормированное среднеквадратическое отклонение друг от друга составляет 0,2. Данный результат указывает на следующие возможности использования бинаризации цифровых голограмм:

- 1) уменьшение размера файлов голограмм при их хранении и передаче по каналам связи;
- 2) вывод таких голограмм для оптического восстановления на физические носители с бинарной модуляцией, а не только многоградационной [5, 7].

На рис. 5а в увеличенном масштабе показано восстановленное изображение объекта, приведённое на рис. 4а. На рис. 5б в том же масштабе показано восстановленное изображение объекта с той же голограммы 512×512 отсчётов, дополненной отсчётами нулевой яркости до числа отсчётов 2048×2048 . Видно, что размер и разрешение элементов изображения объекта остались прежними. При

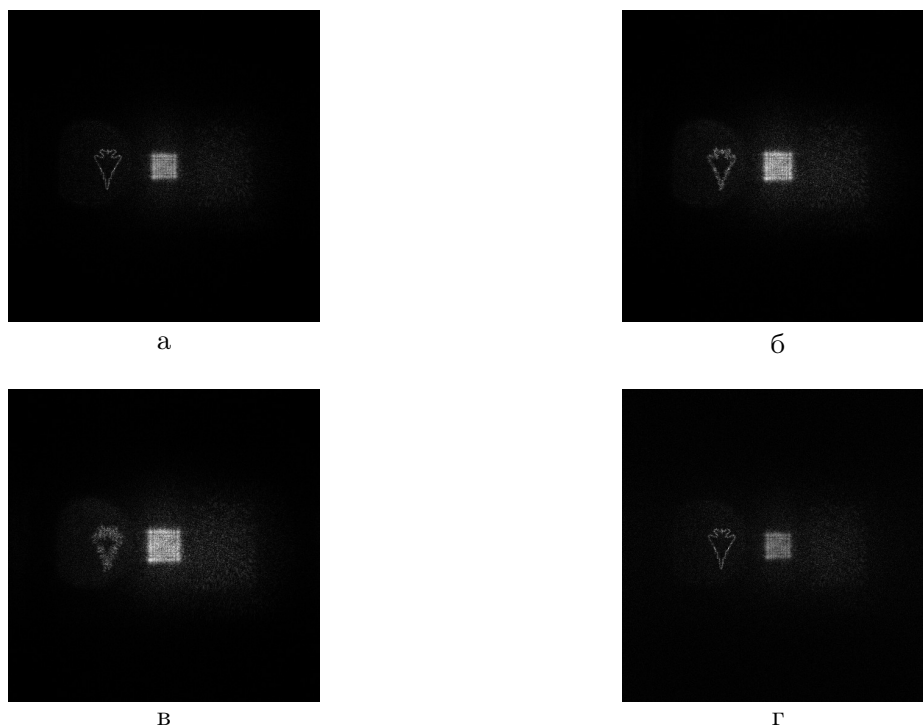


Рис. 4. Численно восстановленное изображение: (а) для $z = 900$ мм; (б) $z = 800$ мм; (в) $z = 700$ мм; (г) с бинаризованной голограммой для $z = 900$ мм

этом характерные размеры спеклов, образующих изображение, уменьшились примерно в четыре раза, что соответствует уменьшению размера отсчёта на поле восстановления в четыре раза.

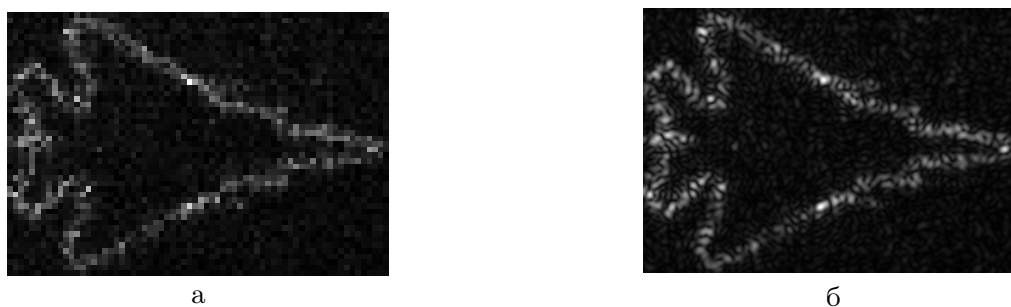


Рис. 5. Численно восстановленные изображения объекта с голограммы с числом отсчётов 512×512 : (а) без дополнения числа отсчётов; (б) с дополнением числа отсчётов до 2048×2048

3.3. Определение поперечных размеров объекта по численно восстановленному изображению

Выполнялась проверка согласования реальных поперечных размеров объекта, записываемого на голограмму, и получаемых из численного восстановления изображения. Для этого была записана цифровая голограмма 2048×2048 отсчётов контурного изображения самолёта в режиме «на просвет», помещённого на

расстоянии 1315 мм от голограммы. По численно восстановленному изображению были определены размеры деталей объекта и произведено их сравнение с результатами прямых измерений:

- измеренное значение размера объекта — $(7,10 \pm 0,05)$ мм;
- размер объекта по численно восстановленному изображению — $(7,01 \pm 0,15)$ мм или (185 ± 4) пикселей (размер пикселя на поле восстановления — 38 мкм);
- измеренное значение ширины контура объекта — $(0,20 \pm 0,05)$ мм;
- ширина контура объекта по численно восстановленному изображению — $(0,208 \pm 0,019)$ мм или $(5,5 \pm 0,5)$ пикселей.

Таким образом, поперечные размеры деталей объекта, рассчитанные с помощью численно восстановленного изображения, совпадают в пределах погрешности с измеренными непосредственно.

3.4. Экспериментальная проверка расчётных оценок предельных параметров голографируемых объектов

Далее была проведена экспериментальная проверка расчётных оценок, приведённых в разделе 2. В качестве тестового объекта было выбрано квадратное отверстие, просвечиваемое лазером через матовый рассеиватель. Размер стороны квадрата мог меняться в пределах $1 \div 30$ мм. Были записаны голограммы размером 2048×2048 отсчётов на расстоянии 1040 мм от объекта и произведено их численное восстановление. На рис. 6 приведены результаты численного восстановления изображений. Для лучшего визуального восприятия полученных порядков дифракции восстановленные изображения приведены в логарифмическом масштабе интенсивности. Видно наличие «-1», «0» порядков дифракции и «+1», соответствующего изображению объекта. На рис. 6а приведено восстановленное отображение объекта, удовлетворяющего случаю с НЦС части «-1» порядка дифракции (поперечный размер объекта $(L_{об} = 2$ мм; граничный поперечный размер объекта согласно расчётам $L_{расч} < 3,4$ мм), на рис. 6б — удовлетворяющее случаю с ДЦС части «-1» дифракционного порядка ($L_{об} = 8$ мм; $3,4$ мм $\leq L_{расч} < 12,6$ мм). На рис. 6в приведено восстановленное изображение объекта, не удовлетворяющее случаю с ДЦС части «-1» порядка дифракции ($L_{об} = 15$ мм; $L_{расч} \geq 12,6$ мм). Видно, что в этом случае «+1» и «-1» порядки дифракции пересекаются.

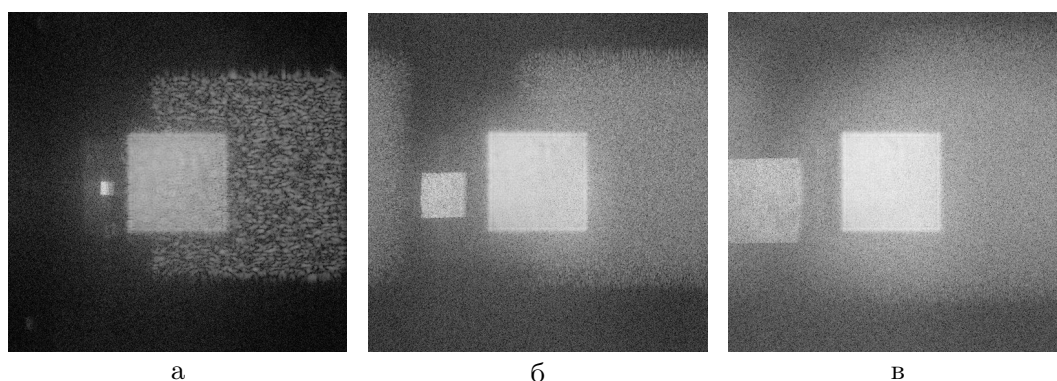


Рис. 6. Численно восстановленное изображение для случая: (а) без допущения циклической перестановки «-1» порядка дифракции; (б) с допущением циклической перестановки «-1» порядка дифракции; (в) с допущением пересечения «+1» и «-1» порядков дифракции

Полученные результаты свидетельствуют о правильности количественных оценок, приведённых в разделе 2, для параметров регистрируемых объектов как с ДЦС, так и с НЦС части «-1» порядка дифракции.

3.5. Поперечное разрешение численно восстановленных изображений объекта

Для проверки оценки поперечного разрешения восстановленных изображений объекта для записи на цифровые голограммы с различным числом отсчётов была выбрана мира, содержащая штриховые структуры с известными периодами. Размер минимально разрешимого элемента восстановленного изображения должен увеличиваться пропорционально уменьшению размера голограммы (см. выражение (1)). На рис. 7 приведены восстановленные изображения миры для голограмм с различным числом отсчётов: 1536×1536 (а), 1024×1024 (б), 512×512 (в). Экспериментально полученные значения размера минимально различимого элемента согласуются с расчётными. Так, на восстановленном изображении миры, представленном на рис. 7а, разрешаются элементы с размером $(0,12 \pm 0,02)$ мм (расчётная величина — $0,12$ мм); на рис. 7б — $(0,16 \pm 0,02)$ мм (расчётная величина — $0,16$ мм); на рис. 7в — $(0,35 \pm 0,04)$ мм (расчётная величина — $0,32$ мм).

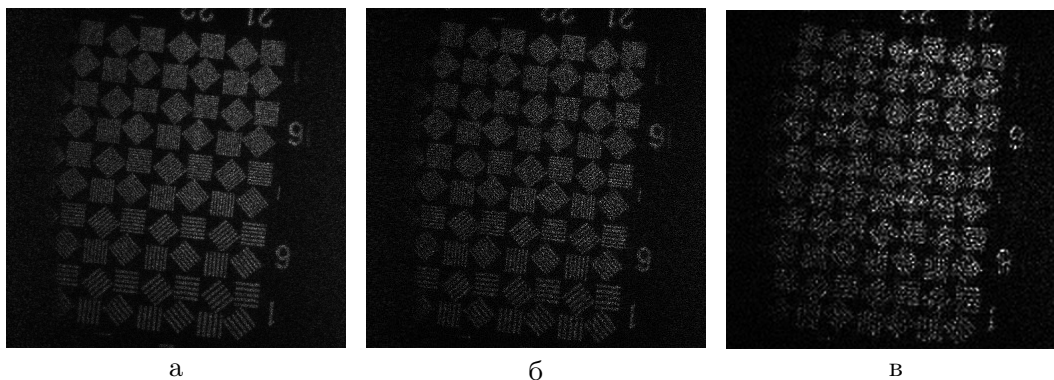


Рис. 7. Численно восстановленные изображения объекта с голограмм с числом отсчётов: (а) 1536×1536 ; (б) 1024×1024 ; (в) 512×512

3.6. Запись цифровой голограммы объёмной сцены в режиме «на просвет» и её численное восстановление

Были произведена запись цифровых голограмм объёмных сцен в режиме «на просвет» с различной глубиной сцены. На рис. 8 приведены восстановленные изображения сечений объёмной сцены, записанной на цифровую голограмму с числом отсчётов 2048×2048 . Объектами были контурные изображения трёх самолётов, расположенные от голограммы на расстояниях $z_1 = 850$ мм (объект № 1), $z_2 = 1190$ мм (объект № 2) и $z_3 = 1330$ мм (объект № 3). Таким образом, глубина сцены составила 480 мм.

Было проведено сравнение измеренных расстояний от каждого из объектов до голограммы и расстояний, при которых получают наиболее резкие восстановленные изображения объектов. Кроме этого, были измерены размеры объектов для соответствующих сечений (z_1, z_2, z_3) и их деталей (ширины границы) и эти же размеры рассчитаны по численно восстановленному изображению. Полученные значения приведены в табл. 1. Размеры пикселей на восстановленном поле в каждом из сечений составили: $0,025$ мм (z_1), $0,034$ мм (z_2) и $0,038$ мм (z_3).

Расстояния от голограммы до объектов сцены и размеры их деталей, рассчитанных с помощью численно восстановленных изображений, совпадают в пределах погрешности с измеренными.

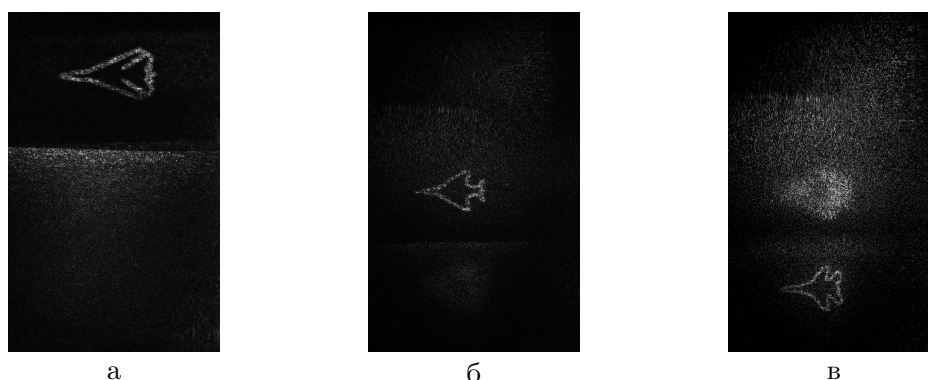


Рис. 8. Численное восстановление сечений объёмной сцены: (а) для $z = 850$ мм; (б) $z = 1190$ мм; (в) $z = 1330$ мм

Таблица 1

Сравнение измеренных и рассчитанных с помощью численно восстановленных изображений размеров объектов сцены и величины их удалённости от голограммы

Характеристика (мм)	№ объекта сцены	Измеренная величина	Расчёт по численно восстановленному изображению
Расстояние от сцены до голограммы	1	850 ± 5	852 ± 5
	2	1190 ± 5	1190 ± 10
	3	1330 ± 5	1330 ± 10
Поперечный размер объекта сцены	1	$5,80 \pm 0,05$	$5,79 \pm 0,12$
	2	$5,90 \pm 0,05$	$5,7 \pm 0,2$
	3	$5,40 \pm 0,05$	$5,3 \pm 0,2$
Ширина границы объекта сцены	1	$0,25 \pm 0,05$	$0,27 \pm 0,02$
	2	$0,25 \pm 0,05$	$0,24 \pm 0,03$
	3	$0,25 \pm 0,05$	$0,27 \pm 0,04$

3.7. Запись цифровых голограмм объёмных сцен в режиме «на отражение» и их численное восстановление

Для записи цифровых голограмм Френеля объёмных сцен в режиме «на отражение» исходная экспериментальная схема, представленная на рис. 2, была изменена следующим образом: зеркало 4 было повернуто так, что отражённый от него предметный пучок падал на объект. В качестве объекта использовалась монета. На рис. 9а приведено восстановленное изображение данного объекта с цифровой голограммы с числом отсчётов 2048×2048 . Как видно, размер монеты превышает размер объектного пучка в горизонтальном направлении. Кроме того, использование в режиме «на отражение» плоской волны для освещения объекта приводит к относительно небольшому диапазону яркостей в восстановленном изображении.

Для увеличения поперечных размеров объектного пучка и для повышения диапазона яркостей в восстановленном изображении в дальнейших экспериментах для формирования объектного пучка использовался упорядоченный волоконно-оптический жгут. Схема экспериментальной установки была изменена следующим образом: плоская волна вместо зеркала 4 попадала на входной торец жгута, а расходящееся рассеянное излучение из его выходного торца освещало объект. Пример численно восстановленного изображения объекта с голограммы ($2048 \times$

2048 отсчётов), записанной с использованием волоконно-оптического жгута, приведён на рис. 9б. Можно наблюдать увеличение горизонтального размера освещаемой области и повышение диапазона яркостей в восстановленном изображении объекта.

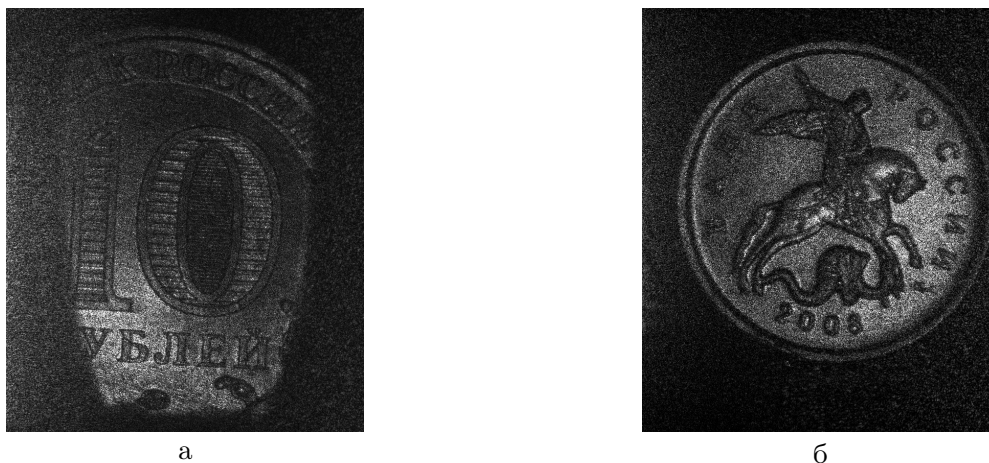


Рис. 9. Численно восстановленные изображения объектов, записанных на голограммы при освещении: (а) плоской волной; (б) рассеянным светом

Как и ранее, при записи голограмм в режиме освещения объектов «на просвет», при использовании режима «на отражение» получено согласование измеренных непосредственно и рассчитанных по численно восстановленным изображениям размеров объектов и их удалённости от голограмм. Так, например, поперечный размер объекта, восстановленное изображение которого приведено на рис. 9б, согласно измерению составил $(10,90 \pm 0,05)$ мм, а рассчитанный с помощью численно восстановленного изображения – $(11,0 \pm 0,3)$ мм.

4. Заключение

В работе рассмотрена схема записи цифровых голограмм Френеля с внеосевым объектным пучком. Получены ограничения на максимальное число отсчётов объекта в поперечном направлении, максимальный поперечный размер объекта, минимальный разрешаемый элемент объекта от расстояния между голограммой и ближайшей к ней точкой объекта, длины волны излучения, числа отсчётов и разрешения голограммы.

Записаны цифровые голограммы Френеля на созданной экспериментальной установке в режимах освещения объектов «на просвет» и «на отражение». Выполнена запись голограмм с числом отсчётов до 2048×2048 , проведено их численное восстановление методом прямого расчёта дифракции Френеля. Проведено сравнение поперечных размеров объектов и их удалённости от голограммы со значениями, полученными по результатам численного восстановления изображений. Результаты совпали в пределах погрешности измерений.

Произведена бинаризация цифровой голограммы и её численное восстановление. Показано, что с помощью бинаризации можно уменьшать размер файлов голограмм при их хранении и передаче по каналам связи, а также выводить такие голограммы на физический носитель с бинарной модуляцией с целью оптического восстановления.

Проведена проверка расчётных оценок предельных параметров голографируемых объектов. Полученные результаты свидетельствуют о правильности зависимостей для параметров регистрируемых объектов, как с допущением, так и недопущением циклического сдвига части «-1» порядка дифракции. Получено

согласие величин поперечного пространственного разрешения восстановленных изображений с расчётными.

В режиме освещения объекта «на просвет» записана цифровая голограмма Френеля объёмной сцены глубиной 480 мм, состоящая из трёх последовательных планов. Получено численное восстановление плоских сечений сцены на различных расстояниях от голограммы. Записаны цифровые голограммы Френеля объёмных сцен в режиме освещения «на отражение» и численно восстановлены изображения сцен. Получено согласование измеренных непосредственно и рассчитанных по численно восстановленным изображениям размеров объектов и их удалённости от голограмм.

Литература

1. Juptner W., Schnars U. Digital Recording and Numerical Reconstruction of Holograms // Meas. Sci. Technol. — 2002. — Vol. 13. — Pp. 85–101.
2. Kronrod M. A., Merzlyakov N. S., Yaroslavski L. P. Reconstruction of Holograms With a Computer // Sov. Phys.-Tech. Phys. — 1972. — Vol. 17. — Pp. 333–334.
3. Goodman J. W., Lawrence R. W. Digital Image Formation from Electronically Detected Holograms // Appl. Phys. Lett. — 1967. — Vol. 11. — Pp. 77–79.
4. Juptner W., Schnars U. Principles of Direct Holography for Interferometry FRINGE 93 // Proc. 2nd Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns: Akademie, Berlin. — Vol. 11. — 1993. — Pp. 115–120.
5. Real-Time Three-Dimensional Object Reconstruction by Use of a Phase-Encoded Digital Hologram / N. Bertaux, Y. Frauel, B. Javidi et al. // Appl. Opt. — 2002. — Vol. 41. — Pp. 6187–6192.
6. Черёмхин П. А., Стариков С. Н. Запись и численное восстановление цифровых голограмм Френеля // Тезисы докладов 46 Всероссийской научной конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии: Москва. — 2010. — С. 58–59. [*Cheryomkhin P. A., Starikov S. N. Zapisj i chislennoe vosstanovlenie cifrovihkh gologramm Frenelya // Tezisih dokladov 46 Vserossijskoj nauchnoj konferencii po problemam matematiki, informatiki, fiziki i khimii: Moskva. — 2010. — S. 58–59.*]
7. Optical Reconstruction of Digital Holograms Recorded at $10.6 \mu\text{m}$: Route for 3D Imaging at Long Infrared Wavelengths / P. Ferraro, A. Finizio, A. Gertrude et al. // Optics Letters. — 2010. — Vol. 35, No 12. — Pp. 2112–2114.

UDC 535.4

Recording and Numerical Reconstruction of Digital Fresnel Holograms

S. N. Starikov, P. A. Cheryomkhin, V. V. Krasnov

*Department of Laser Physics
National Research Nuclear University “MEPhI”
31, Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russia*

The scheme of digital Fresnel holograms recording with off-axis objective beam is considered, estimations of limiting parameters of registered objects are acquired. On the basis of the results experimental setup is created, digital Fresnel holograms in both modes of object's illumination “on transmission” and “on reflection” are recorded. The obtained digital holograms are numerically reconstructed. Calculated and experimental values of the parameters are compared.

Key words and phrases: digital holography, Fresnel hologram.