

Оптический журнал

Голография

УДК 535.417; 535.317; 778.38

Влияние нелинейности синтезированных голограмм на их изображающие свойства

© 2019 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук; Д. С. Смородинов, канд. техн. наук;
С. О. Старовойтов, аспирант

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: smorodinov.denis@gmail.com

Поступила в редакцию 14.01.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-04-38-44

Обсуждаются основные особенности формирования изображения с помощью синтезированных голограмм, обусловленные свойственной им нелинейностью математического описания голографического поля. Особое внимание уделено дискретным полутоновым и бинарным голограммам, представляющим собой предельный случай нелинейных голограмм. Даны рекомендации по выбору условий синтеза, обеспечивающих возможность получения восстановленного изображения, идентичного объекту при максимальном числе допустимых уровней его пороговой обработки.

Ключевые слова: нелинейность, синтезированные голограммы, бинарные голограммы, фотолитография, изображающие свойства.

Коды OCIS: 090.0090.

ВВЕДЕНИЕ

Синтез голограмм в последние годы вызывает всё больший интерес со стороны исследователей и технологов [1, 2]. В качестве наиболее перспективных областей применения синтезированных голограмм можно отметить оценку качества поверхностей [3] или фотолитографию [4, 5], где применение синтезированных голограмм представляется особенно удобным, поскольку применяемые в ней объекты обычно имеют вид простых плоских бинарных амплитудных транспарантов, голограммы-проекторы которых достаточно просто синтезировать.

Как правило, процедура синтеза голограмм состоит в расчёте структуры голографического поля в плоскости его регистрации, представляющем собой математическое описание процессов, происходящих при физической регистрации голограммы [1, 6, 7]. Осуществить подобный расчёт при наличии современного компьютера несложно, необходимо лишь знать структуру, размер минимального элемента (пикселя в случае дискретного объекта) и общий размер объекта, голограмма которого синтезируется, а также рабочую длину волны. Остальные требуемые для осуществления расчёта параметры, такие, как угол падения опор-

ной волны или расстояние между плоскостями голограммы и объекта, определяются на основании данных, указанных выше [8].

Дополнительно упростить задачу можно, разбив объект на типовые дискретные элементы (например, отдельные точки), формирующие в плоскости синтеза голограммы элементарные поля объектных волн. Такой метод известен под названием метода «look-up table». Рассчитанные элементарные распределения можно добавлять на плоскость синтеза голограммы по типу штампов, формируя, таким образом, распределение для всего объекта в целом [9].

Синтезированные голограммы, как известно, имеют характерные отличия от аналоговых, то есть голограмм, записанных традиционными методами. Эти особенности связаны с тем, что синтезированные голограммы имеют дискретную структуру. Фактически это означает, что такая голограмма представляет собой полутоновой транспарант, состоящий из определённого количества ячеек-пикселов, каждая из которых характеризуется амплитудным коэффициентом пропускания, лежащим в пределах от 0 до 1. Отобразить такую голограмму можно в виде рисунка, состоящего из определённого числа градаций серого цвета,

лежащих в интервале от чёрного цвета до белого. Чаще всего для этого используется так называемая серая шкала [10], состоящая из 256 градаций, где 0 — чёрный цвет, 255 — белый.

В целом, подбор параметров синтеза, в соответствии с требованиями, установленными в работе [8], позволяет производить голограммы, структура которых близка к получаемой при физической регистрации интерференционной картины. С их помощью в большинстве случаев можно восстанавливать изображения при сохранении достаточно высокого качества. Однако дискретная структура синтезированных голограмм в любом случае приводит к нарушению одного из фундаментальных принципов голографии — линейности записи.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

В процессе физической регистрации аналоговой голограммы экспозиция, как правило, выдерживается таким образом, чтобы функция её пропускания была прямо пропорциональна интенсивности голографического поля [11]. Голограммы, записанные с учётом этого требования, называются линейными.

Требование линейности записи обусловлено искажениями структуры восстановленных волн при восстановлении голограммы, записанной в нелинейном режиме. Нарушение линейности в общем виде приводит к искажению распределения интенсивности в элементах восстановленного изображения, а также к увеличению влияния интермодуляционных помех, появлению гало (ореолов вокруг изображений) и ложных изображений, искажённых aberrациями. При этом, следует отметить, что правильный выбор условий экспонирования голограммы, т.е. экспозиции и соотношения пучков, в целом является единственным и эффективным способом борьбы с помехами, вызванными нелинейностью.

Если принять, что запись голограммы линейна (рис. 1а), то функция амплитудного пропускания $t(x)$ для голограммы будет иметь вид [6]

$$t(x) = t_0 - kI(x), \quad (1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, t_0 — начальный уровень пропускания, $I(x)$ — функция, описывающая распределение интенсивности голографического поля в плоскости регистрации в зависимости от координаты x . Отметим, что при общем анализе можно ограничиться рассмотрением одномерного случая, поскольку различия в разных плоскостях связаны только с распределением интенсивности. В случае аналоговой записи по вневесовой схеме зависимость интенсивности голо-

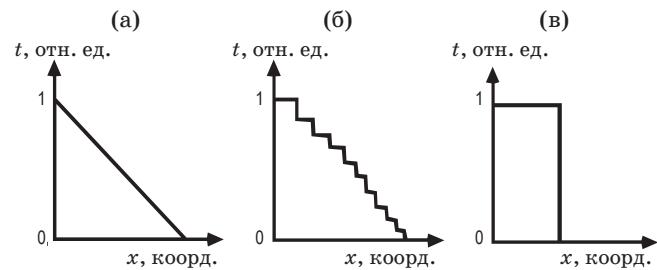


Рис. 1. Зависимость функции пропускания от координаты для аналоговой (а), дискретной (б) и бинарной (в) голограммы.

графического поля от координат выглядит следующим образом:

$$I(x) = A(x)A^*(x) + r^2 + A(x)r \exp(-2\pi i \xi_r x) + A^*(x)r \exp(2\pi i \xi_r x). \quad (2)$$

Здесь $A(x)$ — комплексная амплитуда объектной волны, $A^*(x)$ — амплитуда волны, комплексно-сопряжённой $A(x)$, r — амплитуда плоской опорной волны, ξ_r — пространственная частота опорной волны, зависящая от её длины и угла падения.

Если речь идёт о синтезированной голограмме, то на распределение интенсивности в плоскости регистрации значительное влияние оказывает дискретизация. В этом случае выражение (2) можно записать в виде суммы

$$I_\delta(x) = \left(I(x) \sum_{n=-N}^N \delta(x-nd) \right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{d}\right), \quad (3)$$

где d — период дискретизации голограммы, $2N+1$ — общее число элементов её дискретизации. Отсюда в общем виде можно вывести требования к параметрам синтеза дискретных голограмм плоских объектов, что было сделано в рамках работы [8].

Однако в упомянутой работе не было учтено влияние нелинейности на качество восстановляемого с помощью голограммы изображения. Очевидно, что дискретная голограмма, представляющая собой массив ячеек заданного размера, в каждой из которых может быть зарегистрировано одно из значений, также входящее в строго определённый набор (рис. 1б), будет являться нелинейной. Её функция пропускания может быть только приближённой к подлинно линейной зависимости с некоторой точностью. В свою очередь, точность приближения будет определяться количеством взятых отсчётов.

В работе [8] на основании пространственно-частотного анализа дискретной голограммы было установлено, что период дискретизации голограммы должен быть, по крайней мере, в 4 раза меньше минимального по размеру элемента объекта

(характеристического размера). Связано это с тем, что в соответствии с теоремой отсчётов [12] для успешного восстановления исходного изображения период дискретизации плоскости голограммы d_d должен быть не менее, чем в 2 раза меньше пространственного периода регистрируемой на этой плоскости голограммной структуры T_{\min} . В свою очередь, величина периода T_{\min} в два раза меньше характеристического размера объекта a_t . Значение a_t также принимается в качестве расстояния между центрами соседних точек объекта при синтезе его голограммы.

В то же время, из работы [13] следует, что подобный метод синтеза применим только в отдельных случаях, когда для регистрации восстановленного изображения используются устройства с относительно невысоким разрешением, сравнимым с размером элемента разрешения исходного объекта. В остальных случаях при представлении объекта для синтеза голограмм следует также учитывать критерий разрешения Рэлея, в соответствии с которым периоды дискретизации объекта и голограммы должны быть равны между собой, то есть равны значению d_d . При этом сохраняется требование, в соответствии с которым обе частоты должны быть не менее чем в 4 раза меньше характеристического размера объекта.

Взятие большего количества отсчётов помогает уменьшать влияние нелинейности, которое особенно заметно при регистрации восстановленного изображения с низким разрешением. Продемонстрируем это результатами экспериментального исследования. Оно включало в себя синтез и последующее восстановление ряда голограмм тестового объекта общим размером 23×23 пиксела, названного «уголки». Вид исходного объекта приведён на рис. 2а.

Размеры отрезков, составляющих крест, были равны 1×7 пикселов. Два ближайших к кресту тонких уголка составлены из отрезков толщиной 1 пикセル, расстояние между которыми также было равно 1 пикселу. Далее через промежуток шириной в 2 пикселя располагался третий уголок, ширина которого составляла 2 пикселя. Ширина

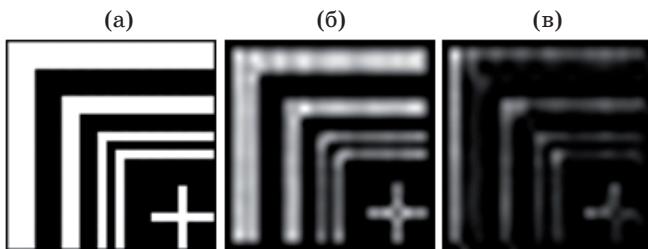


Рис. 2. Тестовый объект (а) и его изображения, восстановленные при стандартном разрешении приёмника с помощью голограмм, синтезированных при расстояниях R_h , равных 20443 нм (б), 20444 нм (в).

четвёртого, самого крупного, уголка была равна 3 пикселям.

Параметры синтеза были выбраны в соответствии с условиями, определёнными в работе [8]. Размер пикселя объекта a_t составлял 80×80 нм, размер пикселя плоскости голограммы $d_d = 20 \times 20$ нм, а рабочая длина волны $\lambda = 13,5$ нм. При таких условиях угол падения опорного пучка α должен быть равен $14,67^\circ$. Минимальное расстояние между плоскостями голограммы и объекта R_h с учётом необходимости пространственного разделения восстанавливающего и восстановленного пучков при выбранных условиях должно составлять не менее 20345 нм. Эксперименты проводились в виртуальном пространстве с использованием разработанного в Университете ИТМО программного комплекса для синтеза и восстановления голограмм-проектов, описанного в работе [9].

Качество изображения, восстанавливаемого с помощью голограммы, синтезированной без учёта критерия Рэлея, оказывается в сильной зависимости от выбранного расстояния R_h . Так, например, изображение при R_h , равном 20443 нм, зарегистрированное с помощью приёмника с размером пикселя 80 нм, полностью различимо (рис. 2б), в то время как увеличение расстояния на 1 нм приводит к тому, что изображение оказывается разрушенным (рис. 2в).

Причина разрушения изображения становится заметна, если для регистрации изображения использовать приёмник с повышенным разрешением, например, с размером пикселя 20 нм. Непрерывное изображение в этом случае фактически распадается на отдельные точки (рис. 3а, 4а). Эти точки могут иметь различную интенсивность, а между

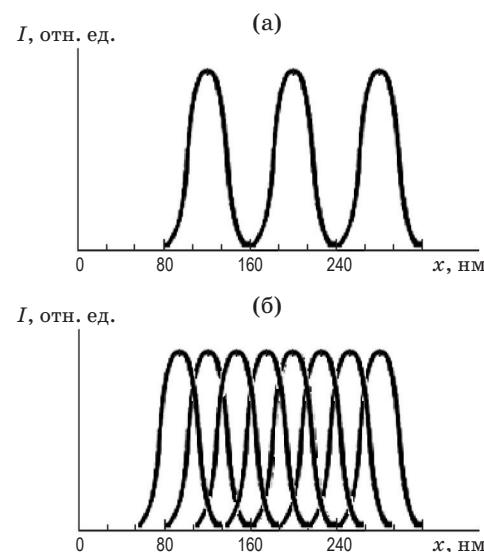


Рис. 3. Регистрация изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных без учёта критерия Рэлея (а) и с учётом (б).

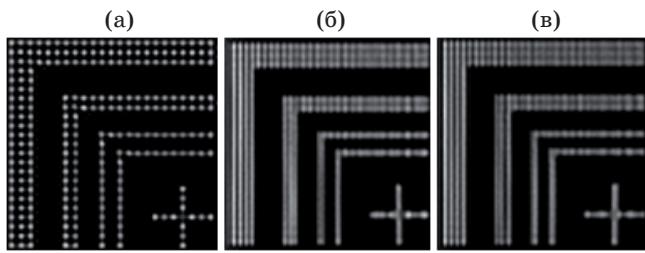


Рис. 4. Изображения тестового объекта, восстановленные при повышенном разрешении приёмника с помощью голограмм, синтезированных без учёта критерия Рэлея (а) и с учётом (б, в), при расстояниях R_h , равных 20443 нм (а, б), 20444 нм (в).

ними заметны вторичные изображения точек, вызванные влиянием нелинейности голограммной структуры.

При изменении расстояния R_h в условиях нелинейности голограммической регистрации изменяется положение и структура ложных изображений и гало вокруг основного изображения, в то время как размер и координаты пикселов на исходном объекте и приёмнике изображения остаются постоянными. Вследствие этого при некоторых значениях параметров синтеза возможно возникновение ситуации, когда значения максимумов интенсивности в точках исходного объекта при восстановлении оказываются заниженными вследствие когерентного сложения основного и ложных изображений, сформированных соседними точками изображения объекта. В результате в этих пикселях регистрируются неверные значения интенсивности.

Конкретные значения расстояний, на которых восстановленное изображение имеет наилучшее качество, в целом будут определяться параметрами синтеза, размерами и общей структурой объекта, поэтому подходящие для практической работы значения R_h должны подбираться индивидуально. Также с учётом того, что изображение в процессе обработки нормируется по максимальному значению интенсивности, отдельные элементы изображения могут выглядеть затемнёнными на фоне более ярких элементов.

В то же время, если при синтезе голограмм учитывать критерий Рэлея, восстановленное изображение остаётся непрерывным (рис. 3б) и сохраняет качество при изменении расстояния R_h (рис. 4б, 4в). Искажения в виде тёмных вертикальных полос на этих изображениях обусловлены интерференцией нулевого и первого порядков дифракции голограмм. Устранить эти помехи можно при помощи пространственного разделения порядков дифракции, для чего следует дополнительно увеличить расстояние R_h в 2–5 раз.

Примеры изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при увели-

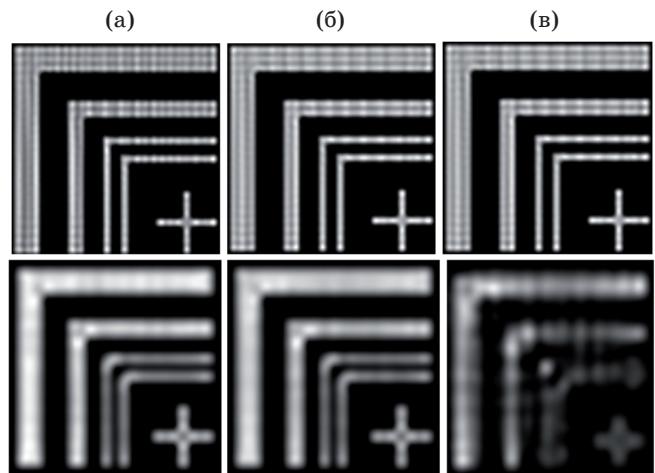


Рис. 5. Изображения тестового объекта, восстановленные с помощью голограмм, синтезированных с учётом критерия Рэлея (верхний ряд) и без него (нижний ряд), при расстояниях R_h , равных 48000 нм (а), 90000 нм (б) и 100000 нм (в).

ченных расстояниях, представлены на рис. 5 в верхнем ряду. Однако поскольку синтезированные голограммы даже при учёте критерия Рэлея остаются нелинейными, восстановленные изображения имеют характерные периодические изменения интенсивности, вызываемые влиянием гало. Они проявляются в виде горизонтальных и вертикальных полос с более низкой интенсивностью, а также лёгкими искажениями на краях элементов.

Увеличение расстояния R_h , тем не менее, не избавляет от искажений, связанных с нелинейностью и ошибками при регистрации в случае, если при синтезе не учитывается критерий Рэлея, а при восстановлении используется приёмник с низким разрешением (нижний ряд рис. 5).

БИНАРНЫЕ ГОЛОГРАММЫ КАК ПРЕДЕЛЬНЫЙ СЛУЧАЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ГОЛОГРАММ

Синтезированные путём компьютерных расчётов голограммы удобны тем, что на этапе синтеза в их структуру можно вносить определённые модификации с целью изменения их изображающих свойств [8, 14]. Однако следует помнить, что внесение искусственных модификаций, как правило, ведёт лишь к увеличению нелинейности. В качестве особого случая модифицированных дискретных голограмм стоит рассмотреть так называемые бинарные голограммы, функцию пропускания которых можно описать следующим выражением:

$$I_{\text{bin}}(x) = \begin{cases} 1, & x \in X \\ 0, & x \notin X \end{cases} \quad (4)$$

Здесь функция пропускания имеет всего два значения (рис. 1в). Пиксел на бинарной голограмме

может иметь единичное, либо нулевое пропускание в зависимости от того, принадлежит ли координата точки некоторому заданному множеству X .

Бинарные голограммы обычно получаются путём бинаризации предварительно синтезированных полутоновых голограмм. В частности, такая операция может быть актуальна, если для изготовления физической копии синтезированной голограммы применяется генератор изображения, обеспечивающий точную передачу только двух градаций коэффициента пропускания по амплитуде [15]. В процессе бинаризации происходит последовательный перебор всех ячеек массива, в котором хранится информация о распределении интенсивности голографического поля синтезированной голограммы. В рамках этого процесса в зависимости от заданных условий значение интенсивности I для каждой из точек изменяется либо на максимальное значение, либо на 0 (рис. 6).

Условия, определяющие значение интенсивности в точке голограммы после её бинаризации, при этом могут быть любыми. К примеру, существуют простые методы бинаризации по верхнему или нижнему порогу, при которых условие определяется заданной величиной уровня бинаризации t [16]. Если значение интенсивности в выбранной точке голограммы до бинаризации больше t в случае бинаризации по верхнему порогу, то оно изменяется на максимальное, в остальных случаях значение обнуляется. Бинаризация по нижнему порогу отличается знаком: интенсивность в выбранной точке изменяется на максимум в случае, если она меньше t и обнуляется в противоположном случае. В других методах предлагается учитывать значения в окрестностях каждой из точек либо использовать специальные бинаризационные матрицы [17, 18]. Однако вне зависимости от выбранного метода бинаризации бинарные голограммы вследствие своей структуры являются предельным случаем нелинейных голограмм и, соответственно, обладают всеми присущими нелинейным голограммам недостатками. Этот факт также можно продемонстрировать при помощи результатов эксперимента. В его рамках был подвергнут бинаризации по верхнему порогу ряд синтезированных при указанных в предыдущих разделах параметрах голограмм тестового объ-

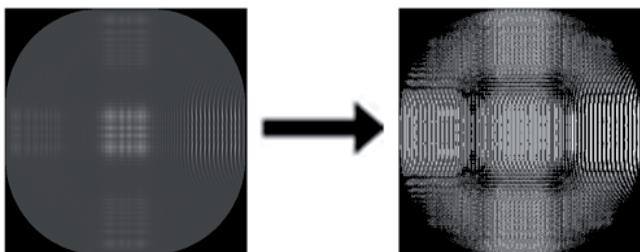


Рис. 6. Бинаризация полутоновой голограммы.

екта, в частности, голограмма, синтезированная с учётом критерия Рэлея при расстоянии R_h , равном 100000 нм. Наиболее качественное из изображений, восстановленных с помощью бинарных голограмм, было получено с помощью голограммы, бинаризованной при уровне $t = 76$ (из 255 возможных в соответствии с «серой шкалой» [10]). Это изображение представлено на рис. 7а, а на рис. 7б приведён один из вариантов изображения после проведения пороговой обработки.

На изображении, представленном на рис. 7б, хорошо заметно, что нарушения качества в значительной степени вызваны наличием вторичных изображений — отрезков, параллельных основным отрезкам, составляющим рисунок. Эти нарушения имеют характерный вид для помех, вызванных влиянием нелинейности, возникающей после бинаризации структуры голограммы.

Нарушения менее заметны в случае, если синтезируется голограмма более простых по структуре, чем «уголки», объектов. К примеру, стандартный тестовый объект может быть разбит на два широких уголка, два тонких и крест. Голограммы каждого из них могут быть синтезированы при тех же параметрах, бинаризированы и восстановлены в отдельности. При этом изображения элементов объекта восстанавливаются без серьёзных нарушений (рис. 8а, 8б, 8в).

Если восстанавливаемое изображение фиксируется на фотоэмulsionии или ПЗС-матрице, то представляется возможным последовательное экспонирование одного участка фотоэмulsionии (ПЗС-матрицы) с восстановлением серии бинарных голограмм, на каждой из которых записан какой-либо из элементов объекта. Таким образом, в итоге

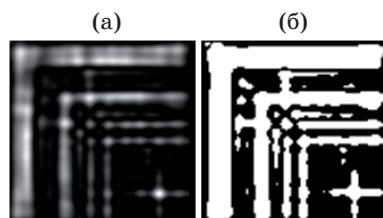


Рис. 7. Изображение тестового объекта, восстановленное с помощью бинарной голограммы: до пороговой обработки (а) и после неё (б).

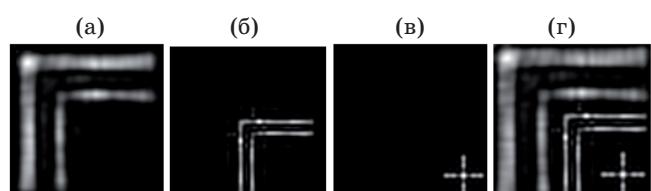


Рис. 8. Фрагменты изображения тестового объекта (а, б, в), восстановленные с помощью бинарных голограмм, и собранное из них полное изображение (г).

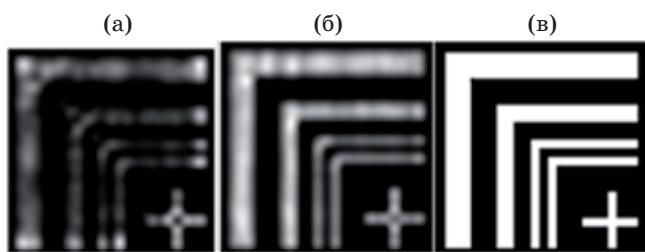


Рис. 9. Изображение тестового объекта, зарегистрированное при низком разрешении, восстановленное с помощью бинарной голограммы до пороговой обработки (а, б) и после (в).

на фотоэмulsionии окажется зарегистрировано полное изображение (рис. 8г).

Кроме того, если для регистрации изображения используется светочувствительный материал с низким разрешением, не превышающим значение a_t , при выборе подходящего расстояния между плоскостями голограммы и объекта R_h возможно возникновение ситуации, аналогичной той, что была рассмотрена выше для случая полутоночных голограмм. Так, если при определённых значениях R_h могут регистрироваться неверные значения в точках изображения, то при других расстояниях аналогичным образом могут остаться незарегистрированными возникающие вследствие нелинейности помехи. В таких случаях объект может быть восстановлен целиком. Более того, возможно восстановление изображения с достаточным качеством при целом ряде уровней бинаризации голограммы [19].

В таком случае для оценки качества восстановленного изображения хорошо подходит количество градаций пороговой обработки. Иначе говоря, чем больше количество уровней пороговой обработки, при которых изображение соответствует исходному объекту (рис. 9б, 9в), тем изображение можно считать более качественным. С учётом того, что всего в соответствии с «серой шкалой» [10] существует 255 уровней пороговой обработки, данный критерий можно считать приемлемым для оценки качества изображения.

Оптимальным уровнем бинаризации голограммы в этом случае можно считать такой, при котором достигается максимальное количество градаций пороговой обработки, удовлетворяющих прийдённому условию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Martinez-Leon L., Clemente P., Mori Y., Climent V., Lancis J., Tajahuerce E. Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination // Optics Express. 2017. V. 25. № 5. P. 4975–4984.
2. Tsang P.W.M., Poon T.-C., Wu Y.M. Review of fast methods for point-based computer-generated holography // Photonics Research. 2018. V. 6. № 9. P. 837–846.
3. Морозов А.М., Кононов И.В. Оптические голограммические приборы. М.: Машиностроение, 1988. 128 с.
4. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука-Физматлит, 2007. 416 с.

В качестве примера на рис. 9 представлены изображения, восстановленные с помощью голограмм тестового объекта, бинаризованных при разных уровнях бинаризации (рис. 9а, 9б). Параметры синтеза были аналогичны тем, которые использовались в предыдущих экспериментах, описанных в настоящей работе, за исключением разрешения объекта и восстановленного изображения, а также расстояния между плоскостями голограммы и объекта, которое было сокращено до минимально допустимого $R_h = 20345$ нм. На рис. 9в приведено изображение, аналогичное рис. 9б, после пороговой обработки.

Более подробно поиск оптимального уровня бинаризации для указанного случая рассмотрен в работе [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования установлено существенное влияние нелинейности синтезированных голограмм на качество восстановляемого с их помощью изображения. Рассмотрены полутоночные голограммы, синтезированные при различных условиях, а также бинарные голограммы. Исследован характер искажений на восстановленных изображениях. Установлено, что появление искажений связано в большей степени с влиянием нелинейности, а также с потерями информации при регистрации изображения при низком разрешении приёмника.

Показано, что использование метода представления объекта на основе критерия Рэлея при синтезе голограмм позволяет в значительной мере избежать искажений, связанных с нелинейностью. В то же время, бинарные голограммы остаются принципиально нелинейными, в связи с чем, в большинстве случаев восстановление качественного изображения с их помощью становится невозможным из-за влияния ложных изображений. Однако при низких разрешениях приёмника, на котором регистрируется восстановленное изображение, а также при оптимальных параметрах синтеза, возможно восстановление качественного изображения с помощью бинарной голограммы.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания (тема № 3.2506.2017/4.6).

5. Bay C., Hübner N., Freeman J., Wilkinson T. Maskless photolithography via holographic optical projection // Opt. Lett. 2010. V. 35. № 13. P. 2230–2232.
6. Кольвер Р., Беркхард К., Лин Л. Оптическая голограмма. М.: Мир, 1973. 686 с.
7. Levenson M.D., Johnson K.M., Hanchett V.C. Chiang K. Projection photolithography by wave-front conjugation // J. Opt. Soc. Am. 1981. V. 71. № 6. P. 737–743.
8. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С. Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 793–801.
9. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Громов А.Д. Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении структуры объекта на типовые элементы и программный комплекс для его реализации // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 12. С. 30–37.
10. Stephen Johnson. Stephen Johnson on digital photography. USA, Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Incorporated, 2006. 305 p.
11. Корешев С.Н. Основы голографии и голограммной оптики. СПб: Университет ИТМО, 2016. 104 с.
12. Биккенин Р.Р., Чесноков М.Н. Теория электрической связи. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 329 с.
13. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С., Громов А.Д. Влияние метода представления объекта на изображающие свойства синтезированных голограмм // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 4. С. 66–73.
14. Zhang Y., Lu Q., Ge B. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography // Optics Communications. 2004. V. 240. № 4 6. P. 261–267.
15. Chen G., Lin C., Kuo M., Chang C. Numerical suppression of zero-order image in digital holography // Optics Express. 2007. V. 15. № 14. P. 8851–8856.
16. Ежова К.В. Моделирование и обработка изображений. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2011. 93 с.
17. Фёдоров А. Бинаризация чёрно-белых изображений: состояние и перспективы развития // Интеллектуальные технологии и системы. Сборник статей аспирантов и студентов. Выпуск 4. Под редакцией Филиппова Ю.Н. М.: Изд-во МГУП, 2002. 304 с.
18. Янковский А.А., Бугрий А.Н. Критерии выбора метода бинаризации при обработке изображений лабораторных анализов // АСУ и приборы автоматики / Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харьков: Изд-во ХНУРЭ, 2010. Т. 153. С. 53–56.
19. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В., Громов А.Д. Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 2. С. 150–155.