

## Влияние метода синтеза голограмм-проекторов и распределения фазы в плоскости объекта на качество восстановленного изображения

С.Н. Корешев<sup>1</sup>, Д.С. Смородинов<sup>1</sup>, С.О. Старовойтов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

Приведены результаты исследования влияния метода синтеза голограмм, а также используемого при описании объектной волны распределения фазы в плоскости объекта на качество восстановленного изображения. Работа выполнена методом численных экспериментов применительно к синтезу голограмм-проекторов двумерных амплитудных бинарных транспарантов – фотошаблонов, предназначенных для использования при реализации метода голографической фотолитографии. Рассмотрены два метода синтеза голограмм: метод, основанный на принципе Гюйгенса, и метод таблиц соответствия. Продемонстрировано влияние фазовых масок, установленных в освещающую объект волну, на качество восстановленного изображения.

**Ключевые слова:** синтез голограмм, метод синтеза, метод Гюйгенса, распределение фазы, голографическая фотолитография, таблицы соответствия.

**Цитирование:** Корешев, С.Н. Влияние метода синтеза голограмм-проекторов и распределения фазы в плоскости объекта на качество восстановленного изображения // С.Н. Корешев, Д.С. Смородинов, С.О. Старовойтов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 203-208. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-613.

**Citation:** Koreshev SN, Smorodinov DS, Starovoitov S.O. Influence of computer-generated holograms synthesis method and phase distribution in the object plane on the quality of the reconstructed image. Computer Optics 2020; 44(2): 203-208. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-613.

### Введение

Синтезированные голограммы в настоящее время находят применение в самых разных областях, среди которых можно отметить оценку качества поверхностей [1] или фотолитографию [2], где использование синтезированных голограмм представляется особенно удобным, поскольку типичные для фотолитографии объекты обычно имеют вид простых плоских бинарных амплитудных транспарантов, голограммы-проекторы которых достаточно несложно синтезировать. Кроме того, использование отражательных голограмм в этой области позволяет отойти от разработки сложных и дорогостоящих проекционных объектов, а отсутствие требований к наличию оптически прозрачных материалов – уменьшить рабочую длину волны и, соответственно, увеличить разрешение фотолитографических изображений.

Компьютерные технологии, используемые при синтезе голограмм, позволяют получать голограммы, имеющие свои особенности формирования изображения, по сравнению с голограммами, изготовленными методом физической голографии, т. е. с помощью непосредственной регистрации реально существующего голографического поля [1–3]. Так, например, дискретная структура синтезированных голограмм предъявляет определённые требования к условиям их регистрации и восстановления, но в то же время имеются эффекты, отсутствующие при традиционной записи, среди которых, например, возможность увеличения глубины резкости [3, 4].

### Влияние метода синтеза голограмм-проекторов на качество восстановленного с их помощью изображения

Как правило, сам процесс синтеза голограмм заключается в расчёте структуры голографического поля в плоскости его регистрации на основании заданных параметров. Обычно для этого используется моделирование процессов, происходящих при физической записи голограммы. В настоящее время изготовление большинства синтезированных голограмм обычно осуществляется одним из трёх основных методов: методом интегральных преобразований [4, 5], методом Гюйгенса [6] и методом таблиц соответствия [7–10]. Однако для целей фотолитографии наиболее подходящими являются два последних метода, поэтому в рамках настоящей работы ограничимся их рассмотрением. В основе метода синтеза голограмм, основанного на принципе Гюйгенса, лежит представление объекта в виде совокупности источников сферических волн. Применительно к компьютерному синтезу голограмм можно сказать, что в этом случае каждый пиксель объекта представляется в виде точечного источника, излучающего в пределах некоторой угловой апертуры  $A$ , зависящей от рабочей длины волны и размера пикселя объекта. При синтезе голограмм эта апертура, как правило, ограничивается угловой шириной первого максимума картины дифракции излучения на пикселе объекта, т. е. величиной  $\sin \alpha$ , равной:

$$A = \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_i}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $a_i$  – размер пикселя объекта. В соответствии с рассматриваемым методом расчёт структуры голограммы осуществляется путём перебора точек (пикселей) голограммы с последующим векторным суммированием для каждой из них единичных (по модулю) амплитуд излучения, испущенного пикселями объекта, расположенными в пределах конуса с углом при вершине  $\pm \sin \alpha$ , отсчитываемым от нормали, восстановленной из центра пикселя голограммы [6]. Отсюда, добавив амплитуду опорной волны и возведя значение суммарной амплитуды в каждой из точек голограммы по модулю в квадрат, можно получить распределение интенсивности голографического поля в плоскости синтеза голограммы.

В доступной на сегодняшний день литературе описаны несколько вариантов метода таблиц соответствия, которые в основном сводятся к предварительному разбиению структуры объекта на типовые элементы – отдельные точки или целые области-полигоны [7–10] с последующим вычислением и суммированием амплитуд голографических полей, порождённых каждым из типовых элементов. Однако идея суммирования полноценных голографических полей выглядит сложной для практической реализации. В этом смысле куда более перспективной выглядит идея модификации метода с целью использования не полноценных голографических полей, а элементарных полей объектных волн типовых элементов, сформированных в заданной плоскости синтеза голограммы [11]. Такие элементарные распределения можно хранить в виде массива и накладывать их на плоскость синтеза по типу штампа, в связи с чем метод получил название метода «штамповки».

Штамп одной точки представляет собой распределение комплексной амплитуды волны, порождаемой светящейся точкой (пикселем) объекта в пределах конуса с углом при вершине, величина которого ограничивается значением  $\sin \alpha$ . При этом в отличие от синтеза по методу Гюйгенса угол отсчитывается от нормали, восстановленной из центра пикселя объекта, а не голограммы (рис. 1).

Итоговая объектная волна в таком случае будет представлять собой совокупность элементарных, ограниченных в размере штампов, центры которых располагаются в точках пересечения с плоскостью голограммы нормалей, восстановленных из центра каждого пикселя объекта. Амплитуда такой волны будет определяться как векторная сумма комплексных амплитуд всех штампов.

Распределения амплитуды объектной волны, рассчитанные двумя рассмотренными выше методами при принятии пикселя объекта за типовой элемент его структуры, отличаются друг от друга лишь описаниями полей на границах объекта. Так, при исполь-

зовании метода Гюйгенса для синтеза голограммы амплитуда объектной волны, соответствующая каждому элементу структуры объекта, считается отличной от нуля в пределах апертуры голограммы с линейным размером  $D_g$ :

$$D_g = L + 2R_z \frac{\lambda}{L}, \quad (2)$$

где  $L$  – линейный размер элемента структуры объекта,  $R_z$  – расстояние от голограммы до объекта,  $\lambda$  – рабочая длина волны. В то же время в случае использования метода «штамповки» линейный размер подобного участка голограммы  $D_i$  будет определяться немного по-другому:

$$D_i = L + 2R_z \frac{\lambda}{a_i}. \quad (3)$$

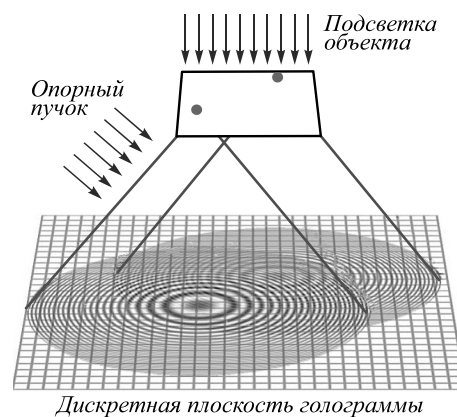


Рис. 1. Синтез голограммы методом «штамповки»

Здесь  $a_i$  – размер пикселя объекта. Конечно, в простейшем случае, когда  $L = a_i$ , различия между выражениями (2) и (3) нет, однако в прочих случаях она может быть весьма значительной.

С помощью таких штампов можно сформировать распределение всей объектной волны на плоскости голограммы, после чего, добавив к результату величину опорной волны, получить итоговое распределение интенсивности на дискретной плоскости, то есть голограмму.

Продемонстрировать влияние рассмотренного выше различия размеров участков апертуры голограммы, несущих информацию об элементах структуры объекта, можно с помощью следующего эксперимента. С помощью разработанного на факультете прикладной оптики Университета ИТМО специализированного программного комплекса были синтезированы и восстановлены в виртуальном пространстве голограммы трёх типов объектов: «штриховая мира», «уголки» и «крупные уголки» (рис. 2).

«Штриховая мира» (рис. 2а) представляла собой три линии шириной 6 пикселей и длиной 30 пикселей с промежутком между ними шириной в 6 пикселей. Объект «уголки» (рис. 2б) имел общий размер 23×23 пикселей и представлял собой совокупность линий

шириной от 1 до 3 пикселей. Линии креста имели размер  $1 \times 7$  пикселей, также из отрезков толщиной в 1 пиксель были составлены два ближайших к кресту уголка, расстояние между которыми составляло 1 пиксель. Ширина третьего уголка составляла 2 пикселя, четвёртого, самого дальнего от креста, – 3 пикселя. Расстояние между вторым и третьим уголками было равно 2 пикселям, между третьим и четвёртым – 3 пикселям.

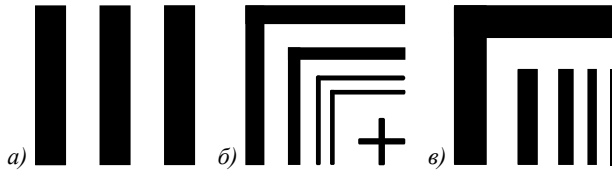


Рис. 2. Объекты «штриховая мира» (а), «уголки» (б) и «крупные уголки» (в)

Объект «Крупные уголки» (рис. 2в) состоял из уголка, ширина линий которого составляла 6 пикселей. Внутри уголка располагались линии шириной от 1 до 4 пикселей и длиной 17 пикселей. Общий размер объекта в результате составлял  $28 \times 28$  пикселей.

Параметры синтеза голограмм были выбраны в соответствии с требованиями, установленными в работе [12]. В частности, в работе было установлено, что в целом для успешного восстановления изображения дискретного объекта период дискретизации синтезированной голограммы должен быть как минимум в 4 раза меньше периода дискретизации самого объекта. В связи с этим при размере пикселя объекта  $a_t$   $80 \times 80$  нм размер пикселя голограммы  $d_d$  должен быть равным  $20 \times 20$  нм. Величина рабочей длины волны была выбрана равной  $\lambda = 13,5$  нм. Подобный выбор был обусловлен её близостью к коротковолновой границе ультрафиолетовой части спектра. Из этих данных следует оптимальное значение угла падения опорной волны  $\theta = 14,67\pi$ , а также минимальное значение расстояния от плоского объекта до голограммы было принято равным  $R_z = 20345$  нм. Вывод данных требований не является предметом рассмотрения настоящей работы.

Однако в случае если для регистрации изображения используется приёмник с высоким разрешением (выше периода дискретизации исходного объекта), то при представлении объекта для синтеза голограмм следует учитывать критерий разрешения Рэлея, иначе при восстановлении изображения с высоким разрешением целостность элементов его структуры будет нарушена. Это проявляется внешне в виде распада единого изображения на отдельные точки (рис. 3а).

Согласно критерию Рэлея изображение соседних точек будет восприниматься как непрерывное в случае, если расстояние между их центрами не превышает величину радиуса диска Эйри:

$$R_E = \frac{1,22\lambda}{2A}, \quad (4)$$

где  $A$  – числовая апертура, определяемая в нашем случае выражением (1),  $\lambda$  – рабочая длина волны. Поскольку речь идёт о дискретных объектах, все расстояния измеряются в периодах, а соотношения между ними должны быть кратны двум. Следовательно, значение  $R_E$  не может превышать величины, равной половине  $a_t$ . Таким образом, для восстановления непрерывного изображения периоды дискретизации объекта и голограммы при синтезе должны быть равны между собой, то есть равны значению  $d_d$ . Пример изображения объекта, восстановленного с помощью голограммы, синтезированной при таких условиях, приведён на рис. 3б.

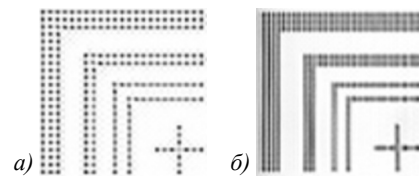


Рис. 3. Изображения объекта «уголки», восстановленные с помощью голограмм, синтезированных без учёта критерия Рэлея (а) и с учётом (б)

Отметим, что для реализации подобного случая можно использовать специальный «штамп», описывающий амплитуду объединённой объектной волны, порожденной полигоном размером 16 пикселей (т.е.  $4 \times 4$ ). Использование подобных объединённых «штампов» позволяет сократить время расчёта голограммы.

Напомним, что рассматриваемое в настоящей работе исследование проводилось методом математического моделирования физического процесса синтеза и восстановления голограмм. Работа выполнялась в виртуальном пространстве и сводилась к выполнению численных экспериментов, включающих в себя синтез и цифровое восстановление голограмм-проекторов с помощью различных вариантов упомянутого выше программного комплекса, один из которых предназначен для работы с методом Гюйгенса, а второй – использует модифицированный метод таблиц соответствия [6, 11]. Разница между изображениями, восстановленными с помощью голограмм, синтезированных при использовании различных методов, особенно хорошо заметна на примере объекта «штриховая мира», состоящего из широких полос. На рис. 4а, 4б приведены изображения, восстановленные с помощью голограмм, синтезированных с помощью метода Гюйгенса и «штамповки» соответственно. При этом на рис. 4а хорошо заметны краевые эффекты, значительно снижающие качество изображения.

Восстанавливаемое с помощью программного комплекса изображение представляет собой дискретный полутоновой объект, состоящий из точек, причём цвет каждой из них равен одному из 256 оттенков серого цвета в соответствии с так называемой «серой шкалой» [13], где уровень 0 соответствует чёрному цвету, 255 – белому. Поскольку исходный объект является бинарным, для сравнения с ним восстановлен-

ное изображение следует подвергнуть бинаризации, то есть пороговой обработке. В соответствии с серой шкалой существует всего 256 возможных уровней пороговой обработки изображения. Численно оценить качество восстановленных изображений можно по количеству допустимых уровней бинаризации восстановленных изображений по верхнему порогу [14], обеспечивающих идентичность структуры восстановленного изображения структуре исходного объекта. Иначе говоря, чем больше количество уровней пороговой обработки, при которых структура восстановленного изображения соответствует структуре исходного объекта (при восстановлении изображения с повышенным, по сравнению с разрешением объекта, разрешением допускаются лёгкие искажения по краям), тем изображение можно считать более качественным. С учётом того, что общее количество возможных уровней ограничено, данный критерий можно считать достаточным для оценки.

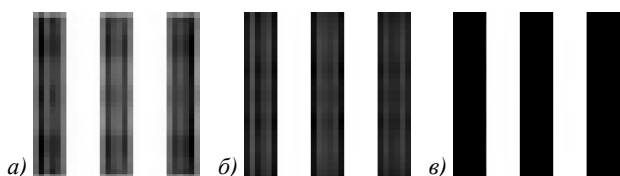


Рис. 4. Изображения объекта «штриховая мира», восстановленные с помощью голограмм, синтезированных при использовании метода Гюйгенса (а) и метода штамповки: до пороговой обработки (б) и после неё (в)

Цифровое восстановление синтезированных голограмм и последующая пороговая обработка восстановленных изображений показала, что метод «штамповки» позволяет синтезировать голограммы, характеризующиеся большим по сравнению с методом Гюйгенса интервалом порогов, при котором обеспечивается полная идентичность структур объекта и восстановленного изображения.

Преимущество метода «штамповки», по сравнению с методом Гюйгенса, не зависело от размера пикселя объекта и сохранялось в случае удовлетворения критерия Рэлея, т.е. в случае равенства размеров пикселей объекта и голограммы (рис. 5).

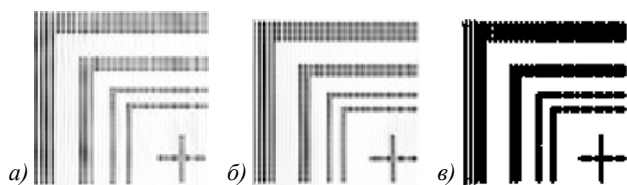


Рис. 5. Изображения объекта «уголки», восстановленные с помощью голограмм, синтезированных с учётом критерия Рэлея при использовании метода Гюйгенса (а) и метода штамповки: до пороговой обработки (б) и после неё (в)

Заметим, что наличие на восстановленных изображениях искажений в виде вертикальных полос (рис. 5а, б), не связано с используемым методом синтеза. Они возникают уже на стадии регистрации вос-

становленного изображения вследствие интерференции нулевого и первого восстановленных порядков и становятся заметными благодаря повышенному разрешению детектора. Избавиться от искажений можно путём увеличения расстояния между объектом и голограммой  $R_z$  [15].

На рис. 5в приведено восстановленное изображение объекта после пороговой обработки. Видно, что за исключением искажений по краям, с учётом повышенного разрешения изображения по сравнению с объектом, изображение в целом соответствует исходному объекту.

Общие результаты проведенных численных экспериментов в виде количества допустимых уровней обработки сведены в таблицу. Полученные данные свидетельствуют о заметном увеличении качества изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных методом «штамповки», по сравнению с голограммами, синтез которых осуществлялся исходя из принципа Гюйгенса. Отметим, что как минимум полуторакартный выигрыш в качестве наблюдался для всех использованных типов объектов вне зависимости от размеров пикселей и соблюдения критерия Рэлея.

Табл. 1 Сравнение качества изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных различными методами

Объект	Количество допустимых уровней пороговой обработки			
	Метод Гюйгенса		Метод «штамповки»	
	Размер пикселя 80 нм	Размер пикселя 20 нм	Размер пикселя 80 нм	Размер пикселя 20 нм
«Штриховая мира»	94	-	162	-
«Уголки»	59	5	112	30
«Крупные уголки»	98	1	173	50

**Влияние распределения фазы в плоскости объекта при синтезе голограммы на качество восстановленного изображения**

Рассмотренный выше метод «штамповки» соответствует нереализуемому в физической голографии случаю регистрации голограммы с установленным перед объектным транспарантом «матовым» стеклом, вносящим одинаковую фазовую задержку в излучение, проходящее через каждый пиксель объектного транспаранта. Это следует из выражения (3), описывающего апертуры, учитываемые при синтезе голограммы проектора. Такая модификация схемы записи голограммы фактически имитирует внесение в схему фазовой маски, и, как следует из описанных выше результатов численных экспериментов, позволяет существенно повысить качество изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированных подобным образом голограмм.

В физической голографии известны описанные в литературе способы управления качеством восста-

новленного изображения путем использования фазовых масок в объектном плече интерферометра, формирующего голографическое поле. Наибольший эффект при этом достигался при использовании масок, вносящих случайный по апертуре и амплитуде сдвиг фазы в пределах от 0 до  $\pi$  (матовые стекла), и масок, вносящих случайный по апертуре фазовый сдвиг, равный либо 0, либо  $\pi$ .

В первом из указанных случаев линейный размер фазовой неоднородности маски выбирался, как правило, меньше элемента разрешения голограммы. Во втором – линейный размер фазовой неоднородности маски обычно выбирался равным размеру минимального элемента структуры объекта.

Эффективность рассмотренных способов влияния на качество изображения, восстановленного с помощью синтезированных методом «штамповки» голограмм, можно продемонстрировать с помощью следующего численного эксперимента. Исследование выполнялось применительно к описанному выше объекту «уголки», при этом размеры пикселей в экспериментах составляли  $80 \times 80$  нм и  $20 \times 20$  нм соответственно. Иначе говоря, линейный размер фазовой неоднородности маски был равен размеру минимального элемента структуры объекта либо меньше него. Используемые при этом параметры синтеза голограмм в общем соответствовали параметрам, указанным в описании к экспериментам, рассмотренным в первой части настоящей работы: рабочая длина волны  $\lambda = 13,5$  нм; угол падения опорной волны  $\theta = 14,67\pi$ ; размеры пикселей голограммы равнялись  $d_g = 20$  нм, при этом характеристический размер объекта был равен  $a_t = 80$  нм. Расстояние между плоскостями голограммы и объекта было увеличено до  $R_z = 48000$  нм с целью избавления от упомянутых выше искажений, вызванных наложением дифракционных порядков.

На рис. 6 представлены изображения, восстановленные с помощью голограмм, синтезированных при использовании «штампа», соответствующего картине дифракции излучения на одном пикселе объекта размером 80 нм. На рис. 6а представлено изображение объекта «уголки», восстановленное с помощью голограммы, синтезированной методом «штамповки» без использования фазовой маски. Изображение, представленное на рис. 6б, получено с помощью голограммы, при синтезе которой использовалась фазовая маска со случайным по апертуре фазовым сдвигом 0 либо  $\pi$ .

На рис. 6в представлено изображение, полученное с помощью голограммы, при синтезе которой использовалась фазовая маска со случайным по апертуре и амплитуде фазовым сдвигом от 0 до  $\pi$ . Отметим, что все приведенные выше изображения пороговой обработке не подвергались.

Из результатов эксперимента следует, что применение случайных фазовых масок приводит к определенному сглаживанию точечной структуры восстановленного изображения и к появлению относитель-

но крупных спеклов невысокого контраста. Справедливость такого вывода подкреплена результатами пороговой обработки восстановленных изображений. Они показали независимый от условий синтеза голограммы уровень качества изображений – количество допустимых уровней пороговой обработки осталось в пределах 100–130 градаций.

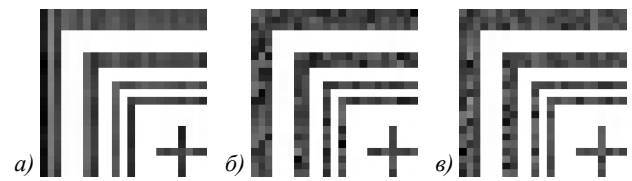


Рис. 6. Изображения объекта «уголки», восстановленные с помощью голограмм, синтезированных методом «штамповки» без фазовой маски (а), с фазовой маской 0 либо  $\pi$  (б) и со случайной по апертуре фазовой маской в пределах от 0 до  $\pi$  (в)

Уменьшение размера пикселя объекта, т.е. учёт критерия Рэлея при синтезе голограммы и использование полигонального штампа общим размером  $80 \times 80$  нм, состоящего из 16 пикселей размером  $20 \times 20$  нм каждый, приводит к несколько другим результатам восстановления голограмм. Так, на рис. 7 представлены изображения, восстановленные с помощью голограмм, синтезированных при отсутствии фазовой маски (рис. 7а); при использовании маски, допускающей два значения фазовой задержки – 0 либо  $\pi$  (рис. 7б), и маски со случайным распределением фазы в диапазоне от 0 до  $\pi$  (рис. 7в).

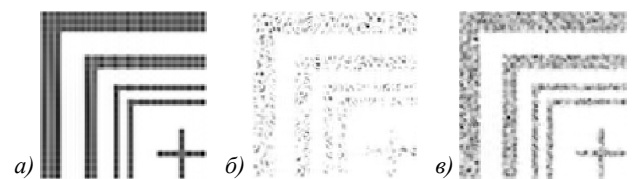


Рис. 7. Изображения объекта «уголки», восстановленные с помощью голограмм, синтезированных с учётом критерия Рэлея без фазовой маски (а), с фазовой маской при случайном распределении фазы 0 либо  $\pi$  (б), с фазовой маской при случайном распределении фазы от 0 до  $\pi$  (в)

Как видим, использование фазовых масок при синтезе голограмм методом «штамповки» с помощью полигонального штампа  $4 \times 4$  пикселя размером 20 нм каждый приводит к появлению в восстановленном изображении спеклов единичного контраста, что делает недопустимым применение полученных таким образом синтезированных голограмм в фотолитографическом процессе.

Это подтверждается и результатами пороговой обработки полученных изображений. Из всех изображений, приведённых на рис. 7, лишь изображение, полученное без фазовой маски, характеризуется интервалом уровней пороговой обработки в 6 градаций. В остальных случаях изображение оказывается практически полностью разрушенным.

### Заключение

В рамках работы проведён сравнительный анализ изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных методами Гюйгенса и модифициро-

ванным методом таблиц соответствия («штамповки»). Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие увеличение качества изображений различных объектов, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при использовании обычных и полигональных «штампов».

Особенно следует отметить увеличение качества на краях изображения, что важно при использовании синтезированных голограмм в фотолитографии. Установлено, что в случае использования при синтезе голограммы «штампа», соответствующего картине дифракции излучения на минимальном элементе структуры объекта, фазовые маски в объектной волне практически не оказывают влияние на качество восстановленного изображения. Использование же фазовых масок совместно с полигональным «штампом» с размером пикселя менее размера минимального элемента структуры объекта приводит к фатальному разрушению структуры восстановленного изображения, что не позволяет использовать синтезированные таким образом голограммы в фотолитографическом процессе.

### Литература

1. **Tsang, P.W.M.** Review of fast methods for point-based computer-generated holography / P.W.M. Tsang, T.-C. Poon, U.M. Wu // *Photonics Research*. – 2018. – Vol. 6, Issue 9. – P. 837-846.
2. **Корешев, С.Н.** Изображающие свойства дискретных голограмм. II. Влияние модификации структуры голограммы и высокой, превышающей частоту Найквиста, несущей пространственной частоты голограммной структуры на восстановленное изображение / С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, Д.С. Смородинов // *Оптический журнал*. – 2014. – Т. 81, № 4. – С. 48-53.
3. **Корешев, С.Н.** Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм / С.Н. Корешев, Д.С. Смородинов, М.А. Фролова // *Оптический журнал*. – 2018. – Т. 85, № 11. – С. 50-57.
4. Методы цифровой голографии / Л.П. Ярославский, Н.С. Мерзляков. – М.: Наука, 1977. – 192 с.
5. **Lohmann, A.W.** Binary Fraunhofer holograms, generated by computer / A.W. Lohmann, D.P. Paris // *Journal of the Optical Society of America*. – 1967. – Vol. 6, Issue 4. – P. 1739-1748.
6. **Корешев, С.Н.** Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов: влияние параметров синтеза на качество восстановленного изображения / С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, Ю.А. Иванов, И.А. Козулин // *Оптический журнал*. – 2010. – Т. 77, № 1. – С. 42-48.
7. **Kim, S.** Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method / S. Kim, E. Kim // *Applied Optics*. – 2008. – Vol. 47, Issue 19. – P. D55-D62.
8. **Kim, S.** Fast computation of hologram patterns of a 3D object using run-length encoding and novel look-up table methods / S. Kim, E. Kim // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48, Issue 6. – P. 1030-1041.
9. **Shimobaba, T.** Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display / T. Shimobaba, H. Nakayama, N. Masuda, T. Ito // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, Issue 19. – P. 19504-19509.
10. **Lucente, M.E.** Interactive computation of holograms using a look-up table / M.E. Lucente // *Journal of Electronic Imaging*. – 1993. – Vol. 2, Issue 1. – P. 28-34.
11. **Корешев, С.Н.** Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении структуры объекта на типовые элементы и программный комплекс для его реализации / С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, А.Д. Громов // *Оптический журнал*. – 2012. – Т. 79, № 12. – С. 30-37.
12. **Корешев, С.Н.** Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства / С.Н. Корешев, Д.С. Смородинов, О.В. Никаноров // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 793-801. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801.
13. **Johnson, S.** Stephen Johnson on digital photography / S. Johnson. – O'Reilly Media, Inc., 2003. – 320 p.
14. Моделирование и обработка изображений. Учебное пособие / К.В. Ежова. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 93 с.
15. Оптика / Г.С. Ландсберг. – Изд. 6-е, стереотипное. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.

### Сведения об авторах

**Корешев Сергей Николаевич**, доктор технических наук, в 1974 году окончил электрофизический факультет ЛЭТИ по специальности «Электроакустика и ультразвуковая техника». С 1974 по 2000 гг. работал в ГОИ им. С.И. Вавилова. В 1986 году защитил кандидатскую диссертацию, в 2000 году получил степень доктора наук. С 2006 года профессор кафедры прикладной и компьютерной оптики Университета ИТМО. Автор более 120 научных работ. Область научных интересов: голография и голограммная оптика, интерферометрия, астрономическая оптика, адаптивная оптика. E-mail: [koreshev@list.ru](mailto:koreshev@list.ru).

**Смородинов Денис Сергеевич**, кандидат технических наук, в 2013 году окончил факультет оптико-информационных систем и технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики со степенью магистра по направлению «Оптотехника». С осени 2013 года – аспирант кафедры прикладной и компьютерной оптики Университета ИТМО. В июне 2016 года защитил кандидатскую диссертацию. E-mail: [smorodinov.denis@gmail.com](mailto:smorodinov.denis@gmail.com).

**Старовойтов Сергей Олегович**, аспирант кафедры прикладной и компьютерной оптики Университета ИТМО. В июне 2018 года защитил магистерскую работу. E-mail: [s.starovoitov95@gmail.com](mailto:s.starovoitov95@gmail.com).

ГРНТИ: 29.31.33

Поступила в редакцию 31 июля 2019 г. Окончательный вариант – 25 сентября 2019 г.

---

# Influence of computer-generated holograms synthesis method and phase distribution in the object plane on the quality of the reconstructed image

S.N. Koreshev<sup>1</sup>, D.S. Smorodinov<sup>1</sup>, S.O. Starovoitov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

## Abstract

The paper presents results of research into the influence of the hologram synthesis method, as well as the phase distribution in the object plane used to describe the object wave, on the quality of the reconstructed image. Using numerical experiments, we synthesized hologram-projectors of two-dimensional amplitude binary transparencies, which present photomasks intended for the implementation of a holographic photolithography method. Two methods of hologram synthesis were considered: a method based on the Huygens principle and a method of look-up tables. It is established that the modified method of look-up tables allows generating holograms characterized by a higher quality of the reconstructed image. The effect of phase mask insertion in the wave illuminating the object on the quality of the reconstructed image is also demonstrated.

**Keywords:** hologram synthesis, method of synthesis, Huygens method, phase distribution, holographic photolithography, look-up tables.

**Citation:** Koreshev SN, Smorodinov DS, Starovoitov S.O. Influence of computer-generated holograms synthesis method and phase distribution in the object plane on the quality of the reconstructed image. *Computer Optics* 2020; 44(2): 202-208. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-613.

## References

- [1] Tsang PWM, Poon T-C, Wu UM. Review of fast methods for point-based computer-generated holography. *Photonics Research* 2018; 6(9): 837-846.
- [2] Koreshev SN, Smorodinov DS, Nikanorov OV. Imaging properties of discrete holograms. II. How structural modification of the hologram and a high spatial carrier frequency of the hologram structure that exceeds the Nyquist frequency affects the image reconstruction. *J Opt Technol* 2014; 81(4): 204-208.
- [3] Koreshev SN, Smorodinov DS, Frolova MA. Method for increasing the depth of field of images of flat transparencies reconstructed using synthesized holograms. *J Opt Technol* 2018; 85(11): 696-702.
- [4] Yaroslavsky LP, Merzlyakov NS. *Methods of digital holography [In Russian]*. Moscow: "Nauka" Publisher; 1977.
- [5] Lohmann AW, Paris DP. Binary Fraunhofer holograms, generated by computer. *J Opt Soc Am* 1967; 6(4): 1739-1748.
- [6] Koreshev SN, Nikanorov OV, Ivanov YuA, Kozulin IA. Program system for synthesis and digital reconstruction of holograms-projectors: synthesis parameters effect on image reconstruction quality. *J Opt Technol* 2010; 77(1): 33-37.
- [7] Kim S, Kim E. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method. *Appl Opt* 2008; 47(19): D55-D62.
- [8] Kim S, Kim E. Fast computation of hologram patterns of a 3D object using run-length encoding and novel look-up table methods. *Appl Opt* 2009; 48(6): 1030-1041.
- [9] Shimobaba T, Nakayama H, Masuda N, Ito T. Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display. *Opt Express* 2010; 18(19): 19504-19509.
- [10] Lucente ME. Interactive computation of holograms using a look-up table. *J Electronic Imaging* 1993; 2(1): 28-34.
- [11] Koreshev SN, Nikanorov OV, Gromov AD. Method of synthesizing hologram projectors based on breaking down the structure of an object into typical elements, and a software package for implementing it. *J Opt Technol* 2012; 79(12): 769-774.
- [12] Koreshev SN, Smorodinov DS, Nikanorov OV. Influence of the discreteness of synthetic and digital holograms on their imaging properties. *Computer Optics* 2016; 40(6): 793-801. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801.
- [13] Johnson S. *Stephen Johnson on digital photography*. USA: O'Reilly Media Inc; 2006.
- [14] Ezhova KV. *Modeling and image processing [In Russian]*. Saint-Petersburg: «NIU ITMO» Publisher; 2011.
- [15] Landsberg GS. *Optika [In Russian]*. Moscow: «Fizmatlit» Publisher; 2003.

---

## Authors' information

**Sergey Nikolaevich Koreshev**, D.Sc. in Engineering, graduated from the Electrophysics Faculty LETI in «Electroacoustics and Ultrasonic Equipment» in 1974. From 1974 to 2000 he worked in the State Optical Institute. In 1986 he defended his PhD thesis, in 2000 he became a Doctor of Science. Since 2006 Professor of Applied and Computer Optics department ITMO. Author of more than 80 scientific papers. His research interests are currently focused on holography and holography optics, interferometry, astronomical and adaptive optics. E-mail: [koreshev@list.ru](mailto:koreshev@list.ru).

**Denis Sergeevich Smorodinov**, PhD in Engineering, graduated from St.Peterburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics in 2013, majoring in Optical Technologies. In June 2016 he defended his PhD thesis. E-mail: [smorodinov.denis@gmail.com](mailto:smorodinov.denis@gmail.com).

---

---

**Sergey Olegovich Starovoitov**, postgraduate student of Applied and Computer Optics department ITMO. In June 2018 he defended his Master thesis. E-mail: [s.starovoitov95@gmail.com](mailto:s.starovoitov95@gmail.com).

---

*Received July 31, 2019. The final version – September 25, 2019.*

---