

### 13. Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм

С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, М. А. Фролова

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Предложен и исследован метод увеличения глубины резкости восстанавливаемых изображений. Метод основан на представлении объектной волны при синтезе голограммы в виде суперпозиции объектных волн, исходящих от двух одинаковых объектов, расположенных на различных расстояниях от плоскости синтеза голограммы. Работа выполнена путем математического моделирования процессов синтеза и восстановления голограммы применительно к случаю синтеза голограмм-проекторов двумерных бинарных объектов для фотолитографии.

**Ключевые слова:** Глубина резкости, Трехмерная фигура рассеяния, Разность хода, Разность фаз, Векторная сумма, Синтез голограмм.

**Цитирование:** Корешев, С. Н. Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм / С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, М. А. Фролова // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 55–62.

#### Введение

Существующая в проекционной фотолитографии тенденция к уменьшению размеров электронных элементов приводит к необходимости увеличения разрешающей способности и полей оптических систем, используемых для фотолитографии. Весьма перспективным в этом плане представляется использование синтезированных с помощью компьютера плоских голограмм-проекторов, позволяющих обойтись без сложных оптических систем [1–3]. Такие голограммы позволяют одновременно формировать относительно большое по площади изображение, свободное от полевых aberrаций. К настоящему моменту хорошо изучены и опубликованы основные особенности синтезированных голограмм [4–6]. Так, известно, что наличие дискретной структуры приводит к необходимости выдерживать определённые соотношения между периодами дискретизации исходного объекта и его голограммы, рабочей длиной волны и углом падения опорного пучка [7, 8]. В то же время, отсутствие реальной физической установки для записи голограмм позволяет в процессе синтеза вносить в расчёт, при необходимости, дополнительные корректировки [9, 10]. Однако использование цифровых технологий при изготовлении голограмм-проекторов до настоящего времени не приводило к каким-либо существенным изменениям глубины резко изображаемого пространства, что вынуждает при реализации фотолитографического процесса обеспечивать очень высокую точность позиционирования пластины, на поверхности которой формируется восстановленное изображение. В настоящей работе приведены результаты выполненного численным методом экспериментального исследования математических моделей процессов синтеза и восстановления голограммы, демонстрирующие возможность применения информационных технологий для управления глубиной резкости восстановленного изображения. В его основу был положен метод увеличения глубины резкости вос-

становленного изображения, основанный на использовании голограммы-проектора, формирующей не одно, а сразу два или более изображений одного и того же объекта, расположенных на некотором небольшом расстоянии друг от друга [11]. Для синтеза такой голограммы следует использовать объектную волну, которая представляла бы собой суперпозицию двух или более объектных волн, формируемых одинаковыми транспарантами-фотошаблонами, расположенными параллельно плоскости голограммы на разных заданных расстояниях от неё (рис. 1). Расстояние между фотошаблонами при этом не должно превышать традиционной для оптики глубины резкости.

Поскольку при синтезе голограммы-проектора дискретный двумерный объект, освещаемый когерентным пучком, падающим перпендикулярно плоскости объекта, можно считать состоящим из светящихся точек, то именно отдельную точку, т. е. пиксель, можно считать минимальным элементом структуры фотошаблона. Обозначим его размер как  $a_i$ . Тогда, если рабочую длину волны принять за  $\lambda$ , то величина числовой апертуры излучения, дифрагировавшего на минимальном элементе структуры, будет описываться выражением

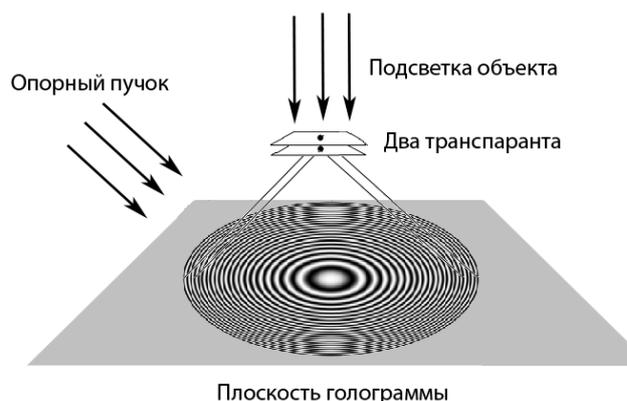


Рис. 1. Схема синтеза голограммы двух параллельных объектов

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

где  $\alpha$  — апертурный угол дифрагировавшего излучения,  $n$  — показатель преломления среды, равный для воздуха  $n = 1$ . Согласно интерференционной теории формирования изображения, фигура рассеяния в изображении точки имеет сигарообразную форму [12, 13]. Длина «сигары» при этом, в общем случае, ограничена выражением

$$|b| \ll \frac{2n}{A^2}. \quad (2)$$

Толщина фигуры рассеяния соответственно равна диаметру диска Эйри

$$D = \frac{1,22\lambda}{A}. \quad (3)$$

В традиционной оптике обычно глубина резкости оптической системы ограничивается таким сдвигом плоскости регистрации изображения относительно плоскости наилучшей установки, при котором центральный максимум дифракционной картины в изображении точечного объекта начинает сливаться с первым кольцом. Поэтому глубину резкости ограничивают следующей величиной [14].

$$|b| = \pm \frac{n}{2A^2}. \quad (4)$$

Поскольку, как уже было сказано выше, объект фактически представляет собой набор светящихся точек, то, казалось бы, установка при синтезе вместо одного двух шаблонов, располагаемых на расстоянии, не превышающем величины, описываемой выражением (4), должна во всех случаях давать заметное увеличение глубины резкости восстановленного с помощью синтезированной голограммы изображения. Однако результаты численного экспериментального исследования, приведённые в работе [11], в которой был кратко рассмотрен предлагаемый метод увеличения глубины резкости, демонстрируют, что для различных расстояний между плоскостями объектов при синтезе голограммы-проектора значения глубины резкости могут значительно отличаться. Причём в некоторых случаях качество изображения, в целом оказывается даже хуже, чем при восстановлении изображения с помощью голограммы, синтезированной при использовании традиционно представляемого объекта, хотя расстояние между плоскостями находилось в пределах, определённых выражением (4). В связи с этим возникает вопрос выбора наилучшего, с точки зрения качества восстановленного изображения, расстояния между плоскостями, что требует дополнительного исследования процесса синтеза голограмм-проекторов с целью учёта всех факторов, влияющих на глубину резкости восстановленных изображений.

### Особенности синтеза голограмм-проекторов и их влияние на глубину резкости восстановленных изображений

Процедура синтеза голограммы, по сути, воспроизводит процессы, происходящие при её физической регистрации. Свет, распространяющийся от точечного источника, в какой-то момент достигает плоскости регистрации голографического поля. При этом результирующая комплексная амплитуда в каждой из точек на плоскости голограммы в целом будет равна сумме значений амплитуд от всех точек объекта, с учётом расстояний между точкой объекта и точкой на голограмме. Для расчётов удобно представить комплексную амплитуду в виде вектора, у которого длина соответствует модулю, а направление — фазе. Суперпозиция комплексных амплитуд тогда будет представляться в виде векторной суммы. Ещё один аспект синтеза относится к соотношению между физическим размером одной точки, как минимального элемента структуры объекта и периода дискретизации голограммы, которая также представляет собой дискретную структуру. Они будут определяться требованиями пространственного разделения дифракционных порядков [7].

Для того, чтобы пучок лучей, исходящий от объекта, был успешно зарегистрирован на голограмме, одновременно с ним на плоскость регистрации должен падать опорный пучок, который будем считать параллельным пучком, причём оба пучка должны быть разделены в пространстве. Если объект представляет собой точку, то угол падения опорного пучка  $\theta$ , отсчитываемый от нормали, не может быть меньше апертурного угла объектного пучка  $\alpha$ . В этом случае минимальный пространственный период записываемой голограммой структуры  $T_{\min}$  будет определяться следующим выражением.

$$T_{\min} \leq \frac{\lambda}{2\sin\alpha}. \quad (5)$$

Из (5) с учётом величины числовой апертуры (1) и теоремы Найквиста [7, 15] можно установить требования, согласно которым размер одного пикселя на плоскости голограммы  $d_d$  должен быть как минимум в 2 раза меньше её пространственного периода, и в 4 раза меньше размера пикселя объекта  $a_i$ .

$$d_d \leq \frac{T_{\min}}{2} \leq \frac{a_i}{4}. \quad (6)$$

Численное восстановление синтезированной голограммы происходит аналогично и включает те же процессы. Поэтому, в случае, когда объект считается чисто амплитудным и не вносит каких-либо изменений в фазу проходящей через него волны, значение фазы при синтезе считается равным нулю во всех точках, составляющих объект. Следовательно, соответствующие точки в любой плоскости восстановленного изображения также будут синфазны. Причём эта синфазность будет сохраняться вне зависимости от расстояния

между голограммой и объектом. Иначе говоря, в рассматриваемом случае синтезированной голограммы суперпозиции двух объектных волн, порожденных одинаковыми объектами, восстановленные изображения в каждой из плоскостей пространства изображений будут характеризоваться постоянной разностью фаз. Величина этой разности будет полностью определяться длиной волны и расстоянием между плоскостями объектов. Из этого следует, что выбор расстояния между плоскостями объектов влияет на распределение комплексной амплитуды восстановленного изображения, что, в свою очередь, влияет и на распределение интенсивности в восстановленном изображении и, в конечном итоге — на глубину резкости. При этом наиболее качественное изображение, т. е. изображение, допускающее наибольшее число уровней пороговой обработки, должно достигаться в случае полной синфазности объектных волн. Рассмотрим разность фаз объектных волн, т. е. волн, формируемых каждым из объектов, реализуемую на плоскости голограммы при подобной записи и факторы, влияющие на нее.

Итак, пусть голограмма располагается вдоль оси  $X$  (рис. 2), где точка  $O$  совпадает с центром голограммы, а  $K$  и  $K'$  — положения двух светящихся точек, порождающих объектные волны, суперпозиция которых регистрируется на плоскости голограммы. Расстояние от точки  $K'$  до плоскости голограммы при этом превышает соответствующее расстояние от точки  $K$  на некоторую величину  $\Delta$ .

Если начальное значение фазы в обоих объектах принять равной нулю, суммарный набег фаз в некоторой точке  $X$ , лежащей на плоскости голограммы вне оси  $Z$  будет зависеть от величин  $XK$ ,  $XK'$ , при этом разница между значениями набега фазы, пришедшими от каждого из объектов, будет определяться расстоянием между ними. Иначе говоря, набег фазы в точке  $X$  от объекта  $K'$  будет отличаться от набега фазы в той же точке от объекта  $K$  на некоторое значение  $\delta\varphi$ , равное

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{OX^2 + OK^2 + 2OK\Delta + \Delta^2} - \sqrt{OX^2 + OK^2} \right). \quad (7)$$

Раскладывая выражение (7) в ряд Маклорена для квадратного корня [16], получаем

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \begin{aligned} &\Delta + \frac{\Delta^2}{2OK} - \frac{OX^2 \Delta}{2OK^2} - \frac{OX^2 \Delta^2}{4OK^3} - \\ &-\frac{\Delta^2}{2OK} - \frac{\Delta^3}{2OK^2} - \frac{\Delta^4}{8OK^3} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Особое внимание следует обратить на третье и четвертое слагаемое выражения в фигурных скобках формулы (8). Нетрудно заметить, что при небольших значениях расстояния между объектами  $\Delta$  основное влияние на конечный результат будет оказывать положение точки на апертуре голограммы, то есть величина  $OX$  или апертура. При этом остальные слагаемые выражения (8) в таких условиях стремятся к нулю, поскольку в целях сохранения высокого качества восстанавливаемых изображений, в большинстве случаев  $\Delta$

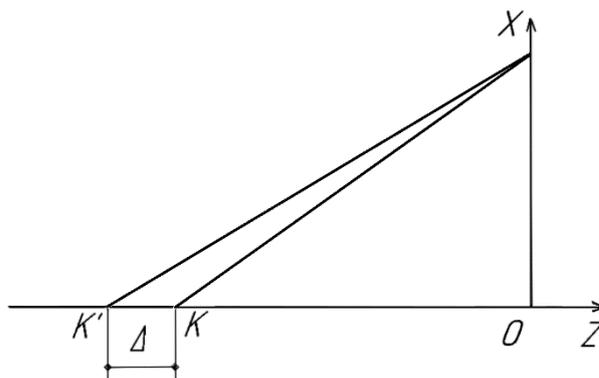


Рис. 2. Синтез голограммы двух точечных источников

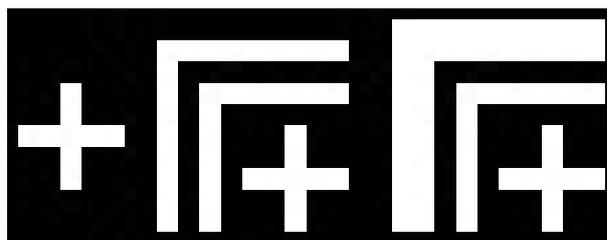


Рис. 3. Объекты «перекрестье», «простые уголки», «широкий уголок»

не превышает значения глубины резкости, определяемого выражением (4) и значительно меньше расстояния  $OK$ . Как результат, значение фазы в точке с координатой  $X$  на голограмме сильно зависит от значения  $X$ .

В то же время, по мере увеличения  $\Delta$  влияние величины  $OX$  постепенно падает и основным фактором, влияющим на распределение фазы в плоскости синтеза голограммы, остаётся расстояние между объектами  $\Delta$ .

Вторым, не менее значимым, фактором является сама дискретизация. С целью экономии ресурсов при расчётах размер дискретных ячеек плоскости регистрации принимается максимально допустимым при заданном значении размера пикселя объекта, в соответствии с выражением (6). Это приводит к тому, что значение комплексной амплитуды, рассчитанное, по идее, для конкретной точки, фактически устанавливается сразу для всего пикселя, имеющего конечные размеры — величину  $d_a$ , которая в два раза меньше пространственного периода голограммы. В результате этого, возникает неопределённость, приводящая к смещению регистрируемого значения фазы и комплексной амплитуды относительно фактического значения для данной точки. Отметим, что смещение на один пространственный период приводит к набегу фазы восстановленного изображения в  $2\pi$ . Кроме того, вблизи границ пикселей происходит резкая смена значений.

#### Экспериментальное исследование предложенного метода увеличения глубины резкости

Экспериментальная оценка зависимости глубины резкости восстановленного изображения объекта от расстояния между объектами при синтезе голограммы,

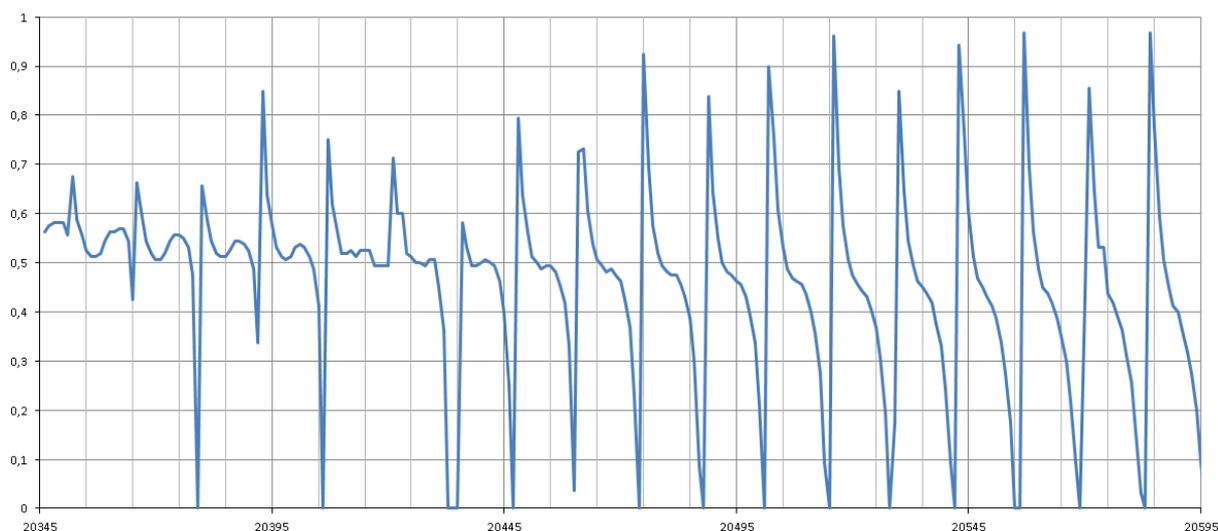
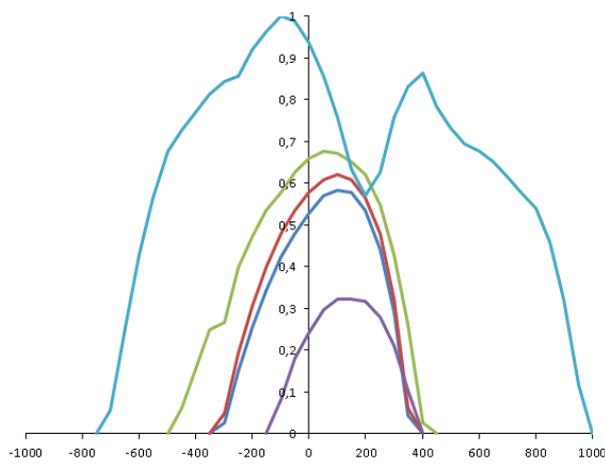


Рис. 4. График зависимости качества изображения объекта «перекрестье», полученного на расчётном расстоянии, от расстояния между объектами

включала в себя синтез голограмм-проекторов нескольких различных объектов (рис. 3). Первый из них представлял собой изображение симметричного перекрестия, состоящего из двух отрезков размерами  $1 \times 5$  пикселей. Второй объект, названный нами «простые уголки» общим размером  $9 \times 9$  пикселей состоял из аналогичного перекрестья, к которому были добавлены два отрезка шириной по 1 пикселю, расстояние между которыми также было равно 1 пикселю. У третьего объекта, получившего название «широкий уголок» была увеличена ширина внешнего уголка на 1 пиксель, в результате общие размеры объекта увеличились до  $10 \times 10$  пикселей.

Параметры синтеза были определены в соответствии с результатами работы [7], таким образом, при размерах пикселя объекта  $a_t$  равных  $80 \times 80$  нм размеры пикселя голограммы  $d_d$  составляли  $20 \times 20$  нм, а расстояние между голограммой и плоскостью ближайшего к ней объекта составляло  $R_h = 20\,345$  нм. Вторая плоскость объекта ставилась чуть дальше от голограммы на некотором расстоянии  $\Delta$  относительно первой, изменяющемся в процессе эксперимента. Рабочая длина волны составляла  $\lambda = 13,5$  нм, а угол падения опорного пучка  $\alpha = 14,67^\circ$ . Глубина резкости восстановленного изображения при указанных параметрах, в соответствии с формулой (4) должна была быть равна  $b = \pm 237$  нм.

Для проведения экспериментов использовался специализированный программный комплекс, разработанный в Университете ИТМО и предназначенный для осуществления синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов [17]. Оценка качества восстановленного изображения производилась с использованием описанного в работе [18] критерия, основанного на подсчёте количества градаций пороговой обработки изображения, при которых оно полностью соответствует исходному объекту.



1 — без установки второй плоскости, 2 —  $\Delta = 4$  нм, 3 —  $\Delta = 21$  нм, 4 —  $\Delta = 195$  нм, 5 —  $\Delta = 199$  нм  
Рис. 5. График зависимости качества восстановленного изображения объекта «перекрестье» от дефокусировки для различных расстояний между плоскостями объектов при синтезе

На рис. 4 представлен график зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки изображения, полученного на расчётном расстоянии  $R_h$ , отнесенных к максимальному числу градаций, достигаемому при данных параметрах синтеза и восстановления голограммы, от расстояния между плоскостями двух объектов  $\Delta$ .

На графике хорошо заметно влияние расстояния между объектами. Пока оно остаётся достаточно небольшим (в пределах нескольких длин волн), качество изображения по мере увеличения расстояния, изменяется достаточно гладко. Исключение составляют отдельные «пики», соответствующие изображениям объекта с более высоким качеством, характерные для расстояний, при которых зарегистрированные объектные волны в процессе синтеза оказываются синфазными. В свою очередь, «провалы» на графике характерны для тех расстояний, на которых объектные

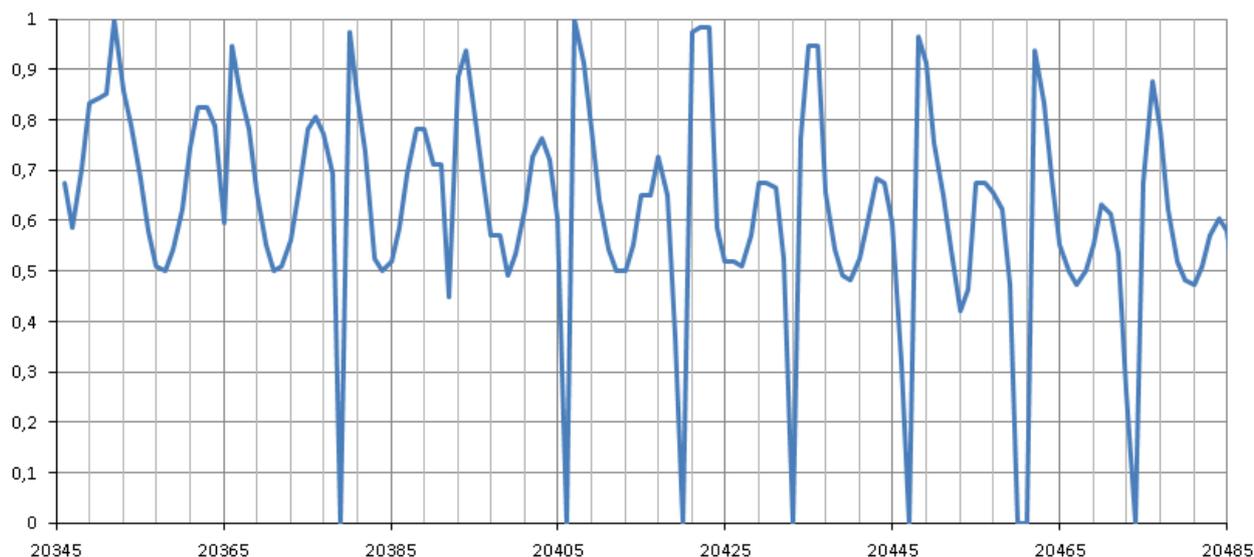


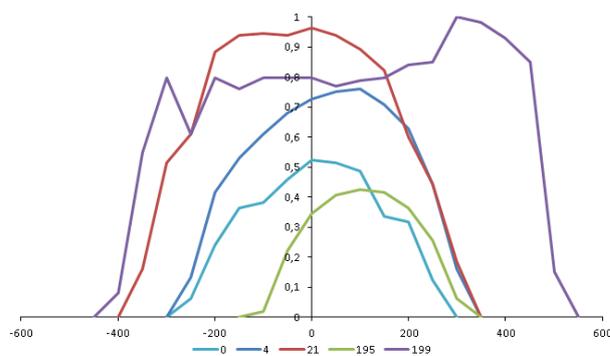
Рис. 6. График зависимости качества изображения объекта «простые уголки», полученного на расчётном расстоянии, от расстояния между объектами

волны оказываются в противофазе. При увеличении расстояния «провалы» становятся глубже — влияние апертуры, смотри выражение (8), уже не может компенсировать нарушение синфазности, в результате чего восстановление качественного изображения с помощью таких голограмм становится практически невозможным. В то же время синфазная запись объектных волн при отсутствии влияния апертуры позволяет значительно улучшить качество изображения. Описанная выше «неопределённость фазы при синтезе голограммы» приводит к появлению резких переходов между соседними «провалом» и «пиком» вследствие резких изменений значений фазы.

Расстояние между соседними пиками соответствует рабочей длине волны  $\lambda$ , таким образом, проверка ряда значений при сдвиге в пределах длины волны, позволяет точно выявить положение пика. При больших значениях расстояния  $\Delta$ , близких к  $b$ , влияние апертуры голограммы практически пропадает — качество изображения, в среднем, заметно ниже, за исключением отдельных «пиков», возникающих при синфазной записи за счёт влияния дискретизации.

Стоит также упомянуть тот факт, что добавление некоторого начального фазового сдвига, не равного 0, ко второй плоскости объекта приводило к сдвигу положений «пиков» и «провалов» вдоль горизонтальной оси. При этом характер картины в целом не меняется в силу эквивалентности распределения фазы в плоскости голограммы и расстояния между плоскостями двух объектов.

Для непосредственной оценки глубины резкости изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при некоторых заданных величинах  $\Delta$ , был восстановлен ряд изображений на расстояниях, отличающихся от расстояния  $R_h$  на значения



1 — без установки второй плоскости, 2 —  $\Delta = 4$  нм, 3 —  $\Delta = 21$  нм, 4 —  $\Delta = 195$  нм, 5 —  $\Delta = 199$  нм  
Рис. 7. График зависимости качества восстановленного изображения объекта «простые уголки» от дефокусировки для различных расстояний между плоскостями объектов при синтезе

от  $-1000$  до  $1000$  нм, с шагом  $50$  нм. Результаты исследования качества изображений, нормированные по максимальному числу градаций, приведены на рис. 5.

Хорошо заметно, что добавление второй плоскости объекта даже на небольшом расстоянии при условии совпадения фазы объектных волн позволяет увеличить как глубину резкости (допустимую величину дефокусировки), так и общее качество изображений (максимальное количество градаций). Наилучшее качество восстановленных изображений достигается при установке второй плоскости объекта на расстояниях, близких к значению предельной величины глубины резкости  $b$ . В этом случае глубина резкости изображения увеличивается в 3–4 раза по сравнению с изображением, восстановленным с помощью голограммы, синтезированной при одиночной плоскости объекта.

На рис. 6 представлен график, аналогичный графику на рис. 4, построенный для объекта «простые уголки». Хорошо видно, что общая картина совпа-

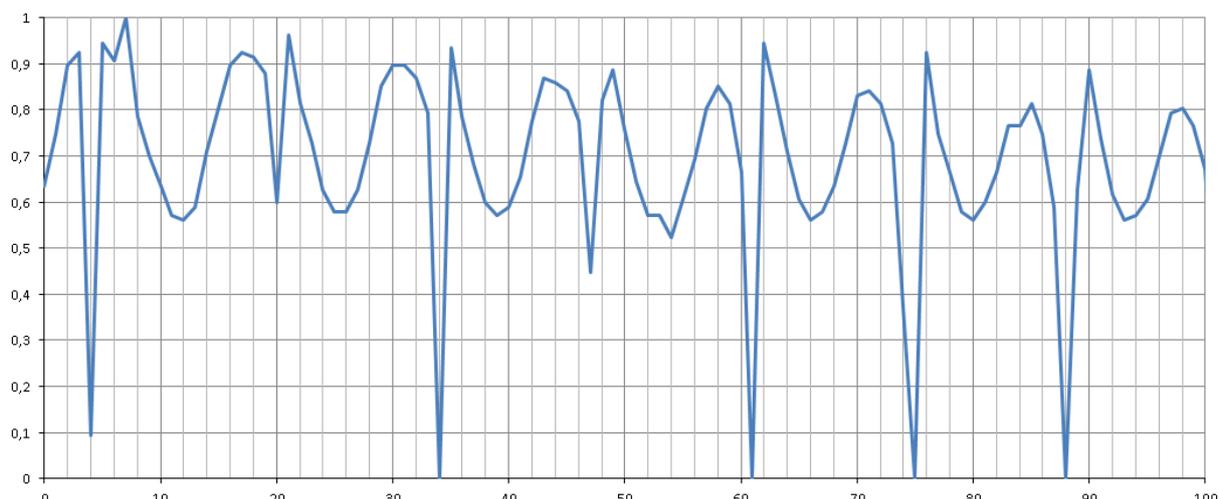


Рис. 8. График зависимости качества изображения объекта «широкий уголок», полученного на расчётном расстоянии, от расстояния между объектами

дает — по мере увеличения расстояния между плоскостями на более-менее ровной картине изменения качества изображения появляются ярко выраженные пиковые и нулевые значения. То же самое заметно и при непосредственной оценке глубины резкости изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при некоторых заданных величинах  $\Delta$ . Можно говорить о том, что при одинаковых параметрах синтеза характер зависимости качества изображения от расстояния между плоскостями объектов, в целом, не зависит от самого объекта, его размеров и формы. Также следует отметить корреляцию между качеством изображения, полученного на расчётном расстоянии и общей глубиной резкости восстановленного изображения, что можно использовать для оценки. Объект «широкий уголок» отличается от предыдущих наличием отрезков разной ширины. График зависимости качества восстановленного изображения данного

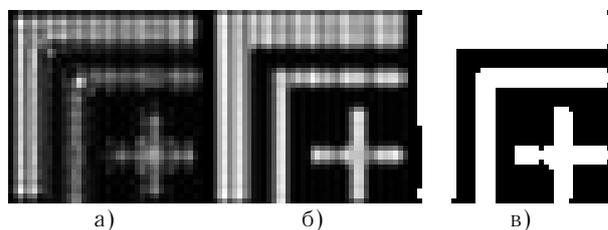


Рис. 9. Изображение объекта «широкий уголок», восстановленное при увеличенном разрешении, с помощью голограмм, синтезированных при наличии расфазировки (а) и синфазной записи объектных волн, до (б) и после (в) пороговой обработки

объекта, полученного на расчётном расстоянии, от расстояния между объектами представлен на рису. 8.

Отметим, что в данном случае при синтезе голограммы объекта, содержащего элементы структуры шириной более 1 пикселя, использован период дискре-

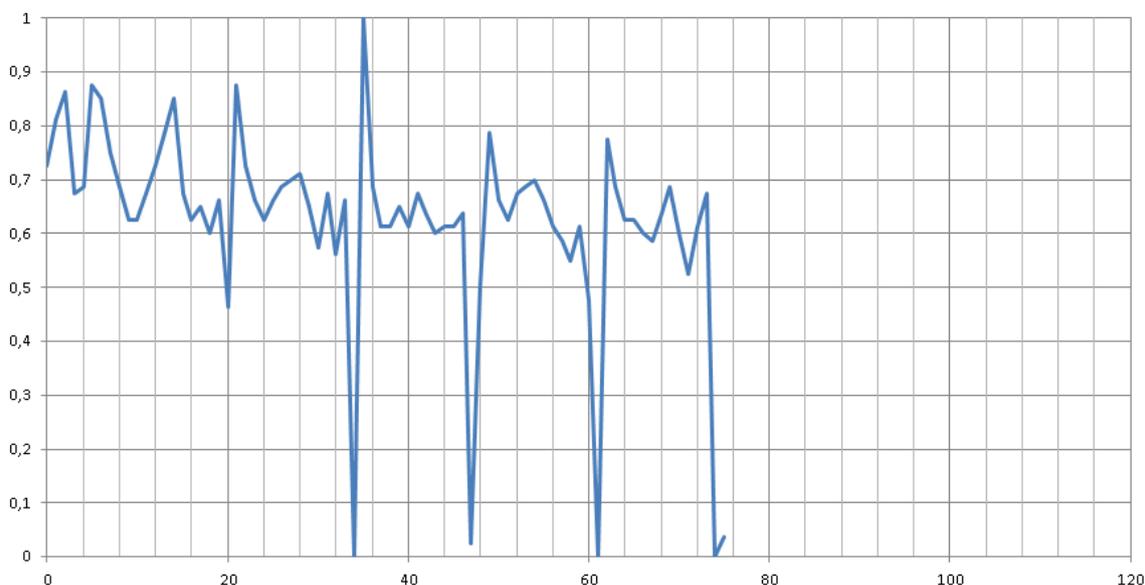


Рис. 10. График зависимости качества изображения объекта «широкий уголок», восстановленного при высоком разрешении на расчётном расстоянии, от расстояния между объектами

тизации объекта, в 4 раза меньший по сравнению с периодом, определенным в соответствии с выражением (6) [19]. Эта особенность обусловлена нарушением требований, предъявляемых к выбору периода дискретизации объекта критерием Рэлея [19, 20]. С целью определения характера влияния периода дискретизации объекта на глубину резкости изображения и описанный выше эксперимент был повторён для случая, когда размер пикселя объекта составляет  $20 \times 20$  нм, т. е. в 4 раза меньше, чем расчётный и совпадает с размером пикселя голограммы  $d_d$ . При этом ширина наиболее тонкого отрезка объекта, то есть его характеристический размер, составляла по-прежнему 80 нм. Остальные параметры синтеза оставались без изменений.

Изображение также восстанавливалось с более высоким, чем в предыдущих экспериментах, разрешением — размер одного пикселя восстановленного изображения составлял те же 20 нм. Заметим, что полное отсутствие нарушений при восстановлении изображения с таким высоким разрешением — скорее исключение, чем правило (рис. 9а и 9б). В связи с этим, качество изображения после пороговой обработки мы условились считать приемлемым в случае, если процент нарушений не превышает 20 % (рис. 9в).

На рис. 10 представлен график зависимости качества изображения объекта «широкий уголок», полученного при восстановлении на расчётном расстоянии изображения с высоким разрешением, с помощью голограммы, синтезированной при более высоком разрешении объекта. На графике по-прежнему выделяются характерные «пики» и «провалы». Таким образом, при сохранении одинаковых параметров синтеза, включая минимальный размер элемента объекта, общий характер зависимости изменяется слабо.

### Заключение

Таким образом, можно говорить о том, что предложен способ увеличения глубины резкости восстановленных изображений. Установлен характер зависимости качества изображения объекта, восстановленного с помощью голограммы, синтезированной при использовании двух плоских объектов, от расстояния между объектами. Характер данной зависимости не изменяется при сохранении основных параметров синтеза. В соответствии с этой зависимостью, оптимальное, в плане качества восстановленного изображения, значение расстояния будет определяться синфазностью объектных волн при синтезе и должно быть близким к предельному значению глубины резкости.

### Список источников

- [1] **Clube, F.** Holographic microlithography / F. Clube, S. Gray, D. Struchen, J. Tisserand, S. Malfoy, Y. Darbellay // *Opt. Eng.* — 1995. — Vol. 34. — № 9. — P. 2724–2730.
- [2] **Maiden, A.** Nonplanar photolithography with computer-generated holograms / A. Maiden, R. McWilliam, A. Purvis, S. Johnson, G. L. Williams, N. L. Seed, and P. A. Ivey // *Optics Letters.* — 2005. — Vol. 30. — № 11. — P. 1300–1302.
- [3] **Bay, C.** Maskless photolithography via holographic optical projection / C. Bay, N. Hübner, J. Freeman, and T. Wilkinson // *Optics Letters.* — 2010. — Vol. 35. — № 13. — P. 2230–32.
- [4] **Collier, R. J.** Optical holography / R. J. Collier, C. B. Burkhardt, L. H. Lin. — Bell Telephone Laboratories, 1971.
- [5] **Levenson, M. D.** Projection photolithography by wave-front conjugation / M. D. Levenson, K. M. Johnson, V. C. Hanchett, K. Chiang // *J. Opt. Soc. Am.* — 1981. — Vol. 71. — P. 737–743.
- [6] **Martínez-Leon, L.** Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination / L. Martínez-Leon P. Clemente, Yutaka Mori, V. Climent, J. Lancis, E. Tajahuerce // *Optics Express.* — 2017. — Vol. 25 (5). — P. 4975–4984.
- [7] **Koreshev, S. N.** Imaging properties of discrete holograms. I. How the discreteness of a hologram affects image reconstruction / S. N. Koreshev, O. V. Nikanorov, D. S. Smorodinov // *Journal of Optical Technology.* — 2014. — Vol. 81. — № 3. — P. 123–127.
- [8] **Zhang, Y.** Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography / Y. Zhang, Q. Lu, B. Ge // *Optics communications.* — 2004. — Vol. 240. — № 4-6. — P. 261–267.
- [9] **Chen, G.** Numerical suppression of zero-order image in digital holography / G. Chen, C. Lin, M. Kuo, C. Chang // *Optics Express.* — 2007. — Vol. 15. — № 14. — P. 8851–8856.
- [10] **Koreshev, S. N.** 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 / S. N. Koreshev, O. V. Nikanorov, D. S. Smorodinov // *Journal of Optical Technology.* — 2014. — Vol. 81. — № 4. — P. 204–208.
- [11] **Koreshev, S. N.** Methods of increasing the resolving power and depth of field of synthesized hologram-projectors / S. N. Koreshev, O. V. Nikanorov, M. A. Frolova, Ya. A. Novitskaya, R. I. Khisamov // *Journal of Optical Technology.* — 2016. — Vol. 83. — № 12. — P. 760–764.
- [12] *La granularite laser (speckle) et ses applications en optique* / M. Francon. — Institut d'Optique et Universite de Paris. — 1978.
- [13] *Principles of optics* / M. Born, E. Wolf. — Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt: Pergamon Press, 1968.
- [14] **Koreshev, S. N.** Synthesizing hologram-projectors for photolithography on nonplanar surfaces / S. N. Koreshev, O. V. Nikanorov, D. S. Smorodinov, A. D. Gromov // *Journal of Optical Technology.* — 2015. — Vol. 82. — № 2. — P. 90–94.
- [15] **Lohmann, A. W.** Variable Fresnel zone pattern / A. W. Lohmann // *Appl. Optics.* — 1967. — Vol. 6. — № 9. — P. 1567–1570.
- [16] *Advanced Engineering Mathematics* / D. M. Greenberg. — Prentice Hall, 1998. — 646 p.

- [17] **Koreshev, S. N.** Method of synthesizing hologram projectors based on breaking down the structure of an object into typical elements, and a software package for implementing it / S. N. Koreshev, O. V. Nikanorov, A. D. Gromov // Journal of Optical Technology. — 2012. — Vol. 79. — № 12. — P. 769–774.
- [18] **Koreshev, S. N.** Reconstruction of synthesized holograms-Fresnel projectors at angles of incidence of reconstructing wave that exceed the angle of incidence of the reference wave in hologram synthesis / S. N. Koreshev, O. V. Nikanorov, V. P. Ratushnyi // Optics and Spectroscopy. — 2011. — Tom III. — № 1. — P. 134–138.
- [19] **Koreshev, S. N.** How the method of representing an object affects the imaging properties of synthesized holograms / S. N. Koreshev, O. V. Nikanorov, D. S. Smorodinov, A. D. Gromov // Journal of Optical Technology. — 2015. — Vol. 82. — № 4. — P. 246–251.
- [20] **Koreshev, S. N.** Effect of object-discretization period on the depth of field of images reconstructed using synthesized Fresnel hologram-projectors / S. N. Koreshev, D. S. Smorodinov, M. A. Frolova // Journal of Optical Technology. — 2017. — Vol. 84. — № 11. — P. 773–776.

## **A method of increasing the depth-of-field of images of flat discrete transparencies, reconstructed using synthesized holograms**

*S. N. Koreshev, D. S. Smorodinov, M. A. Frolova*

Saint Petersburg National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

The effect of the hologram-projector synthesis parameters on distributions of complex amplitude in planes of the hologram synthesis and reconstructed image is considered. A method of increasing the depth-of-field of reconstructed images was proposed and investigated. The method is based on the representation of an object wave in the synthesis of a hologram in the form of a superposition of object waves emanating from two identical objects located at different distances from the hologram synthesis plane. The work is carried out by the method of mathematical modelling of the processes of synthesis and reconstruction of a hologram in the context of the case of synthesis of holograms-projectors of two-dimensional binary objects for photolithography.

*Keywords:* Depth of Field, Three-dimensional scatter figure, Path difference, Phase difference, Vector sum, Hologram synthesis.