

## ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ И ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ НА ИХ ИЗОБРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА

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

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

### Аннотация

Приведены результаты исследования влияния дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства, т.е. на структуру и качество восстанавливаемого с их помощью изображения. Установлены и обоснованы требования, обеспечивающие идентичность структур объекта и восстановленного изображения и предъявляемые к соотношениям между основными параметрами синтеза или регистрации дискретной голограммы – рабочей длиной волны, углом падения опорной волны, минимальным размером элемента, структурой объекта и периодом дискретизации голограммы. Рассмотрена возможность смягчения указанных требований, обеспечиваемая либо модификацией структуры голограммы, либо использованием характерного для дискретных структур эффекта подмены частот.

**Ключевые слова:** голография, синтезированная голограмма, цифровая голограмма, дискретность, изображающие свойства, метод представления, бинаризация.

**Цитирование:** 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.

### Введение

В последние годы наблюдается интенсивное развитие цифровой и компьютерной техники, что приводит к заметному росту интереса исследователей и разработчиков оптоэлектронной аппаратуры к синтезированным и цифровым голограммам.

Под синтезированными обычно понимаются голограммы, рассчитанные с помощью компьютера и отображенные на физическом носителе при помощи генераторов изображений. Цифровые голограммы, напротив, регистрируются в когерентном излучении с помощью ПЗС-матриц или каких-либо иных электронных приборов. Однако и те, и другие голограммы принципиально схожи и отличаются от голограмм, записанных традиционным способом, тем, что имеют дискретную структуру.

К настоящему времени вопросы синтеза голограмм достаточно хорошо освещены в литературе. Например, в [1–3] описаны методы, позволяющие осуществлять синтез голограмм, пригодных для практического применения в задачах фотолитографии, в которых объект, как правило, представляет собой двумерный транспарант. Их суть в общем случае состоит в расчёте интенсивности голографического поля в каждой точке, плоскости голограммы, осуществляемом при тех или иных параметрах синтеза [4], таких как длина используемой волны, расстояние между объектом и голограммой, размер минимального элемента структуры объекта и т.д.

В то же время особенности формирования изображения дискретными голограммами или, другими словами, их изображающие свойства рассмотрены недостаточно подробно. Между тем понимание этих особенностей является очень важным фактором, поскольку позволяет в значительной степени оптимизировать процесс синтеза и восстановления голограмм с точки зрения затрачиваемых на его осуществление

аппаратных и временных ресурсов. Это и обусловило необходимость выполнения настоящей работы, поставленной с целью исследования изображающих свойств дискретных голограмм и выполненной применительно к синтезированным голограммам-проекторам, используемым в задачах проекционной голографической фотолитографии.

### 1. Изображающие свойства дискретных голограмм

#### Влияние дискретной структуры голограммы на восстановленное с её помощью изображение

Исследование изображающих свойств дискретных голограмм удобнее всего начать с анализа пространственного спектра поля, восстановленного при помощи дискретной голограммы поля  $U_d(\xi)$  [5]:

$$U_d(\xi) = t_0 F \{ r \exp(2\pi i \xi_r x) \} - k F \{ r \exp(2\pi i \xi_r x) \} \otimes \left( \left[ \begin{array}{l} F \{ A(x) A^*(x) \} + F \{ r^2 \} + \\ + F \{ A(x) r \exp(-2\pi i \xi_r x) \} + \\ + F \{ A^*(x) r \exp(2\pi i \xi_r x) \} \end{array} \right] \otimes \left( \sum_{n=-N}^N \delta(\xi - \xi_n) \right) \right) \otimes a(\sin(\pi \xi a) / \pi \xi a). \quad (1)$$

Анализ, результаты которого приведены в настоящей работе, проводился для случая дискретной амплитудной голограммы двумерного объекта-транспаранта, формируемой при помощи объектной волны, распространяющейся вдоль нормали к плоскости синтеза, или регистрации голограммы, и опорной волны, падающей под некоторым углом к ней (внеосевая схема записи голограммы, или схема Лейта-Упатниекса [6]). Выбор именно такого объекта исследования не приводит к потере общности получае-

мых результатов, поскольку амплитудный тип модуляции голограммы сказывается лишь на ее линейности и дифракционной эффективности, не внося заметных изменений в обусловленные дискретностью особенности ее изображающих свойств.

Первое из слагаемых выражения (1) описывает амплитуду излучения, восстановленного с помощью непрерывной голограммы, зарегистрированной в аналоговой форме. Второе слагаемое является свёрткой выражения, описывающего спектры нулевого и первых порядков дифракции аналоговой голограммы, с суммой дельта-функций. Оно описывает периодическое повторение спектра поля, восстанавливаемого с помощью непрерывной голограммы, обусловленное влиянием дискретной структуры голограммы.

При этом период мультипликации данного спектра оказывается равным  $\xi_n = 1/d_d$ , где  $d_d$  – период дискретизации голограммы. Следует заметить также и то, что во втором слагаемом выражения (1) присутствует произведение мультиплицированного спектра с функцией, зависящей от величины  $\sin(\pi\xi a)$ , что свидетельствует о наличии модуляции спектра восстановленного поля. В случае синтезированной голограммы эта модуляция определяется диаметром фокального пятна генератора изображений, или фил-фактором ПЗС-матрицы в случае цифровой голограммы. Отметим, что пространственная частота восстанавливающей волны соответствует максимуму этой модулирующей функции.

Спектр амплитуды поля, восстановленного с помощью дискретной голограммы, схематично изображён на рис. 1 [7, 8]. Объект здесь характеризуется полосой пространственных частот  $\pm\Delta/2$ . Пики шириной  $2\Delta$  на этой схеме представляют интермодуляционные помехи. Более узкие пики шириной  $\Delta$  соответствуют спектрам изображений, восстанавливаемых в первых порядках дифракции голограммы. Периодическое повторение спектра восстанавливающей волны, вызванное влиянием дискретной структуры, описывается дельта-функциями, обозначенными на схеме стрелками.

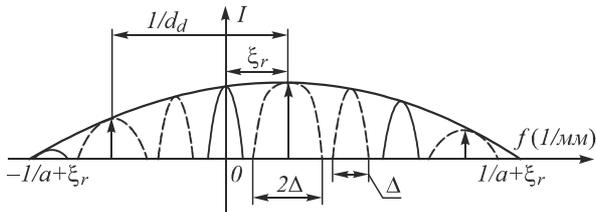


Рис. 1. Спектр поля, восстановленного при помощи голограммы с дискретной структурой

Вид спектра свидетельствует о наличии определенных условий, позволяющих выбрать оптимальные с точки зрения обеспечения пространственного разделения компонентов восстановленного поля параметры синтеза, или регистрации, голограммы. Так, если выбрать период дискретизации голограммы равным диаметру фокального пятна используемого генератора изображений (пикселя ПЗС-матрицы):

$$a = d_d, \tag{2}$$

то узлы огибающей будут совмещены с положениями мультиплицированных спектров восстанавливающей волны, в результате чего мультипликация спектра восстанавливающей волны будет подавлена. При этом сохраняется требование пространственного разделения всех компонентов восстанавливаемого поля, что приводит к необходимости искусственного ограничения ширины спектра регистрируемого объекта. Это ограничение можно записать в виде неравенства:

$$\Delta \leq 1/4d_d. \tag{3}$$

В свою очередь, отсюда можно определить требование к пространственной частоте опорной волны. Она должна быть равна:

$$|\xi_r| = \sin|\theta|/\lambda = 1,5\Delta_{\max}, \tag{4}$$

где  $\Delta_{\max} = d_d/4$ . Далее из выражения (4) следует условие выбора оптимального угла падения опорной волны:

$$\sin|\theta| = 1,5\lambda/4d_d. \tag{5}$$

Из (5) следует новое ограничение, предъявляемое к величине рабочей длины волны, используемой для восстановления дискретной голограммы. Поскольку величина  $\sin|\theta|$  не может быть больше 1, длина волны, подходящей для восстановления синтезированной голограммы, не может превышать величины периода дискретизации голограммы более чем в 2,7 раза.

Выражение (3), связывающее ширину спектра объекта с периодом дискретизации голограммы, позволяет вывести ограничения максимальной пространственной частоты объекта  $\xi_{o\max}$ , возникающие вследствие влияния его дискретной структуры:

$$|\xi_{o\max}| = \Delta_{\max}/2 = 1/8d_d. \tag{6}$$

В свою очередь, из (6) следует ограничение минимального размера элемента структуры объекта  $a_i$ , связанное с дискретной структурой голограммы:

$$a_i \geq 1/2|\xi_{o\max}| = 4d_d. \tag{7}$$

Из (5) с учетом (7) следует, что для гарантии пространственного разграничения всех порядков дифракции минимальный размер элемента объекта должен составлять не менее  $1,5\lambda$ . Впрочем, и в этом случае на голограмме будет зарегистрирована лишь боковая полоса спектра объекта. Для успешной голографической регистрации спектра объекта целиком следует обеспечить регистрацию информации в полосе частот:

$$\xi_{\max} \leq 2\Delta_{\max} = 4|\xi_{o\max}|. \tag{8}$$

Воспользовавшись условием формирования бегущей незатухающей волны [3], из (8) получим следующие выражения:

$$4|\xi_{o\max}|\lambda \leq 1, \tag{9}$$

$$|\xi_{o\max}| \leq 1/4\lambda. \tag{10}$$

Отсюда следует, что при условии сохранения пространственного разделения порядков дифракции голограммы зарегистрировать на дискретной голограмме весь спектр объекта возможно лишь при выполнении неравенств:

$$a_i \geq 2\lambda \text{ и } d_d \geq \lambda/2. \tag{11}$$

В то же время отметим, что в соответствии с дифракционными ограничениями минимальный размер элемента структуры изображения в оптике принят равным рабочей длине волны  $\lambda$ . Следовательно, наличие дискретной структуры голограммы приводит, как минимум, к полуторакратному, а то и двукратному увеличению размера минимального элемента восстановленного изображения.

Влияние модификации структуры дискретных голограмм на их изображающие свойства

Поскольку большая часть обработки дискретных голограмм происходит в виртуальном пространстве, то становится возможным некоторым образом модифицировать их структуру с целью совершенствования их изображающих свойств [8, 9]. Например, уменьшив функцию, описывающую распределение интенсивности голографического поля, на величину квадрата модуля амплитуды объектной волны, можно устранить интермодуляционные помехи из восстановленного с помощью дискретной голограммы поля [10]. Распределение интенсивности  $I'$  в плоскости синтеза, либо регистрации, голограммы после проведения такой модификации будет описываться следующей формулой:

$$I' = r^2 + 2ar \cos(\phi_a - \phi_r). \tag{12}$$

Подобная модификация оказывает существенное влияние на структуру спектра восстановленного поля и приводит ее к виду, представленному на рис. 2.

Как видим, центральные пики, соответствующие интермодуляционным помехам, ушли. Допустимая ширина спектра объекта при этом увеличивается, что позволяет уменьшить величину оптимального угла падения опорной волны, а также допустимую величину одного пикселя дискретной голограммы. Возможное возникновение контрастных искажений в восстановленных изображениях вследствие внесения изменений в структуру в данном случае несущественно, поскольку речь идёт о бинарных объектах.

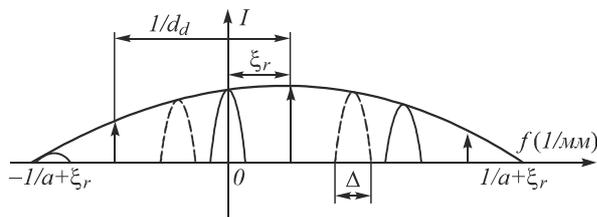


Рис. 2. Спектр поля, восстановленного при помощи голограммы с дискретной модифицированной структурой

Справедливость установленных соотношений продемонстрирована при помощи экспериментов, в рамках которых было синтезировано несколько голограмм одного тестового объекта (рис. 3).

При проведении исследования, результаты которого описаны в настоящей работе, использовались следующие параметры синтеза голограммы, выбранные в соответствии с установленными требованиями: рабочая

длина волны  $\lambda = 13,5$  нм; размер минимального элемента структуры объекта (1 пикселя)  $a_i = 80$  нм; расстояние между плоскостями объекта и голограммы  $R_h = 20345$  нм; период дискретизации голограммы  $d_d = 20$  нм; угол падения плоской опорной волны  $\theta = 14,67^\circ$ . В то же время в рамках данного исследования значение угла падения опорной волны, а также вид структуры голограммы (наличие либо отсутствие рассмотренной выше модификации) изменялись.

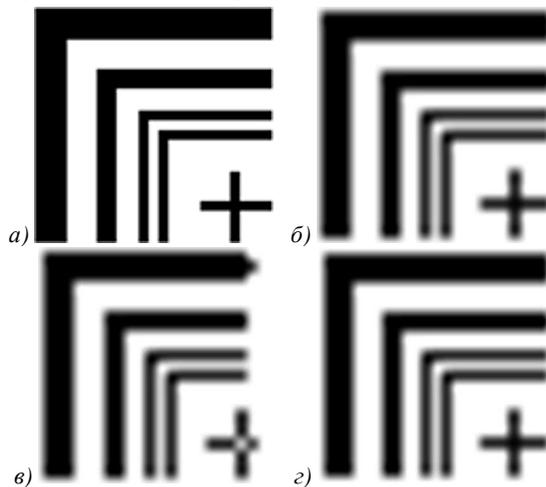


Рис. 3. Стандартный тестовый объект (а) и его изображения, восстановленные с помощью голограмм, записанных при расчётном угле падения опорной волны  $\theta = 14,7^\circ$  (б); уменьшенном угле  $\theta = 9,7^\circ$  без модификации структуры (в) и с модифицированной структурой (з). Изображения подвергнуты пороговой обработке

Отметим также, что все эксперименты, о которых идёт речь в данной работе, выполнены с помощью специализированного программного комплекса, разработанного в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики на кафедре прикладной и компьютерной оптики и предназначенного для осуществления синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов [4].

Из результатов исследования, приведенных на рис. 3, видно, что при несоответствии угла падения опорной и восстанавливающей волн выражению (5) восстановление изображения со структурой, идентичной структуре объекта, с помощью синтезированной голограммы невозможно. В то же время модификация голограммы позволила уменьшить допустимый угол падения опорной волны.

Рассматриваемая модификация полезна, в первую очередь, при регистрации цифровых голограмм бинарных объектов, поскольку ПЗС-матрицы, используемые для этого, как правило, имеют относительно невысокую разрешающую способность. Изменение угла падения опорной волны позволяет снизить пространственную частоту регистрируемой голограммной структуры, благодаря чему становится возможным обеспечить успешную регистрацию голограммы при достаточно крупных размерах пикселя ПЗС-приёмника.

*Эффект подмены частот при записи  
и восстановлении дискретных голограмм*

Говоря о дискретных голограммах, нельзя не отметить ещё одну их особенность. Дело в том, что дискретность структуры цифровых и синтезированных голограмм приводят к так называемому эффекту подмены, или маскировки, регистрируемых пространственных частот [10, 11].

Этот эффект проявляется при записи цифровых голограмм в том, что высокие пространственные частоты воспринимаются детектором приёмника как более низкие, не превышающие предельно допустимую частоту Найквиста, равную  $|F_n| = 1/2d_d$ , где  $d_d$  – период дискретизации сигнала:

$$\xi_r = 2mF_n + \xi = 2m/2d_d + \xi. \quad (13)$$

Здесь  $\xi_r$  – пространственная частота регистрируемой голограммной структуры;  $\xi$  – разность пространственных частот  $\xi_r$  и  $2mF_n$ ;  $2m$  – округленное до ближайшего целого чётного числа частное от деления регистрируемой пространственной частоты  $\xi_r$  на частоту Найквиста  $F_n$ .

В рамках работы установлено, что данный эффект возможно использовать с целью регистрации низкочастотных цифровых голограмм под большими углами падения опорных волн в случае, когда объект расположен на нормали к плоскости регистрации. Если пространственную частоту голограммы считать соответствующей выражению (4), то формулу (13) можно преобразовать следующим образом:

$$\frac{\sin \theta'}{\lambda} = \frac{m}{d_d} \pm \frac{\sin \theta}{\lambda}, \quad (14)$$

где  $\theta$  – малый угол падения опорного пучка, определённый исходя из требований соблюдения критерия Найквиста;  $\theta'$  – увеличенный угол схождения пучков;  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Отсюда, в свою очередь, следует выражение для допустимых значений угла падения опорного пучка:

$$\theta' = \arcsin(\sin(\theta) \pm m(\lambda/d_d)). \quad (15)$$

Данное обстоятельство может быть полезно в случае, когда регистрация голограммы при угле падения опорной волны, определённом в соответствии с (5), не представляется возможным в связи с конструктивными ограничениями установки для регистрации.

Отметим, что эффект подмены частот проявляется не только при регистрации цифровых голограмм, но и при восстановлении синтезированных, что делает возможным осуществлять их восстановление под углом падения восстанавливающего пучка, увеличенным по сравнению с углом падения опорного пучка, используемого в процессе синтеза.

**2. Зависимость изображающих свойств синтезированных голограмм от метода представления объекта**

В связи с тем, что синтезированные голограммы имеют дискретную структуру, возникает необходи-

мость применения в процессе расчёта распределения комплексной амплитуды определённых допущений, вызванных её влиянием. Как результат, реальное описание распределения комплексной амплитуды объектной волны в плоскости объекта, полученное с учётом допущений, представляет собой определённую совокупность дискретных отсчетов. Поскольку голографируемый объект для успешного осуществления задачи синтеза также должен иметь дискретную структуру, можно сформулировать, что фактически в процессе синтезе мы имеем дело с дискретной голограммой дискретного объекта. Соответственно, параметры, использованные при дискретизации объекта, или, иначе, метод его представления, не могут не оказывать на изображающие свойства синтезированных голограмм определённого влияния [12].

В соответствии с формулой (11) для успешного восстановления изображения дискретного объекта, период дискретизации синтезированной голограммы должен быть как минимум в 4 раза меньше периода дискретизации самого объекта. Эта же величина принимается в качестве расстояния между центрами соседних точек при формировании синтезированной голограммы.

Однако исследования показали, что в случае, если используемые фоторезисты или электронные фотоприёмники имеют большое разрешение, т.е. размер пикселя которых меньше, чем величина  $a_t$ , данный метод представления объекта слабо подходит для практического использования. При этом следует отметить, что сам факт использования регистраторов восстановленного изображения с размером пикселя, меньшим  $a_t$ , в процессе восстановления синтезированных голограмм не влияет на минимальный размер пикселя исходного объекта, отображаемого в восстановленном изображении. В строгом соответствии с (11), размер пикселя восстановленного изображения определяется исключительно периодом дискретизации голограммы и её апертурой и равен  $a_t$ .

Рис. 4 демонстрирует тестовый объект и его изображение, восстановленное при различных значениях разрешающей способности фоторезиста либо ПЗС-матрицы, используемых для регистрации изображения.

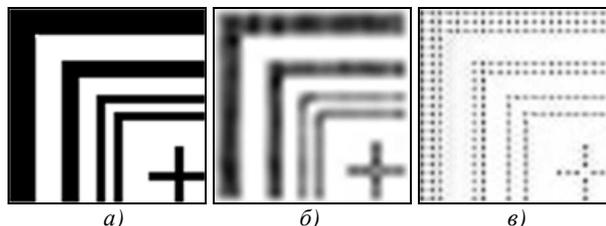


Рис. 4. Тестовый объект (а) и его изображение, восстановленное с различным разрешением: стандартным (б); и увеличенным по сравнению с ним в 4 раза (в)

Из представленных изображений следует, что до тех пор, пока разрешение фоторезиста не превышает размер точки исходного объекта (такое разрешение получило название стандартного), изображение сохраняется непрерывным, что говорит о его пригодности для применения в фотолитографическом процессе

(рис. 4б). В то же время в случае использования фоторезистов с большим разрешением единое изображение объекта фактически распадается на отдельные точки (рис. 4в).

Наличие данного эффекта обусловлено нарушением при синтезе критерия разрешения Рэля, в соответствии с которым составляющие изображение точки воспринимаются в качестве отдельно стоящих в случае, если провал в распределении интенсивности двух соседних точек превышает 22,5 % [6].

В соответствии с этим сформулируем условие выбора метода представления объекта при синтезе голограмм, гарантирующего непрерывность восстановленного изображения. Так, согласно критерию Рэля, расстояние между центрами соседних точек не должно превышать величину радиуса диска Эйри:

$$R_E = 1,22(\lambda/2A), \quad (16)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $A$  – числовая апертура. С учётом того, что

$$A = \lambda/a_i, \quad (17)$$

где  $a_i$  – размер отдельной точки как минимального элемента объекта, получим:

$$R_E = 0,61a_i. \quad (18)$$

Поскольку речь идёт о дискретных объектах, то все соотношения между периодами должны быть кратны двум. Отсюда следует итоговое требование к периоду дискретизации объекта, который должен удовлетворять неравенству:

$$R \leq 0,5a_i. \quad (19)$$

В соответствии с (19), в процессе синтеза голограммы необходимо выбирать такой период дискретизации объекта, который был бы не менее чем в 2 раза меньше расчётного периода, определённого в соответствии с результатами пространственно-частотного анализа.

Полученные в ходе работы выводы были проверены экспериментально. Для этого были синтезированы голограммы двух объектов – стандартного тестового объекта и вертикальной линии шириной в 2 пикселя. При синтезе использовался разный период дискретизации объекта – от 80 нм (расчётная величина) до 20 нм (в 4 раза меньше расчётного).

Изображения, восстановленные с помощью каждой из голограмм, представлены на рис. 5.

Из результатов экспериментов следует, что наилучшее качество восстановленного изображения реализуется в случае использования при синтезе голограмм-проекторов метода представления, характеризуемого периодом дискретизации объекта в 4 раза меньшим по сравнению с периодом, считавшимся оптимальным исходя из (11).

В случае сложного объекта различия между вторым и третьим изображениями практически незаметны, для простых объектов небольшие различия всё же сохраняются и, вероятно, связаны с более высокими требованиями к точности изображения.

Таким образом, установлено, что для качественного восстановления изображения в процессе синтеза голограммы необходимо брать не менее четырёх отсчетов функции пропускания объекта на каждый из элементарных разрешаемых фрагментов его структуры.

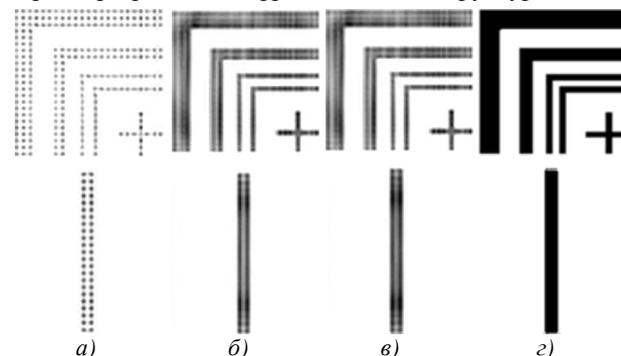


Рис. 5. Изображения различных объектов, полученные при восстановлении голограмм, синтезированных при периодах дискретизации объекта (диаметр точки  $p$ ), равных: а) 80 нм; б) 40 нм; в) 20 нм; г) 20 нм, после пороговой обработки. Размер элемента разрешения регистратора изображения: 10 нм

### 3. Бинаризация синтезированных голограмм и её влияние на качество восстанавливаемых изображений

Ещё одной важной особенностью пригодных для использования на практике синтезированных голограмм является бинарная структура. Дело в том, что обычно синтезированная голограмма в компьютерном виде представляет собой полутоновой транспарант, как правило, состоящий из 256 оттенков серого цвета [13]. В то же время для отображения такой голограммы на физическом носителе используются специальные лазерные генераторы изображений, которые на сегодняшний день могут обеспечить точную передачу только двух градиент коэффициента пропускания по амплитуде [14]. Это приводит к необходимости применения операции бинаризации по отношению к синтезированной голограмме, что, в свою очередь, дополнительно изменяет её изображающие свойства.

Голограмма обычно бинаризуется по верхнему порогу в соответствии с выбранным уровнем бинаризации  $t$ , равным от 0 до 256. В общем случае объект может состоять из элементов разных размеров. В соответствии с этим уровень бинаризации должен быть подобран таким образом, чтобы после восстановления изображения и его пороговой обработки никакие из элементов объекта не были нарушенными, то есть чтобы их интенсивности были примерно одинаковыми. С целью установления зависимости интенсивности восстановленного изображения от размера исходного объекта был проведён анализ, в рамках которого сравнивались интенсивности восстановленных изображений двух объектов – единичной точки и прямоугольника размером  $m \times n$  точек.

Интенсивность изображения прямоугольника  $i_{mn}$  будет зависеть от соотношения площадей исходного объекта  $S_0$  и участка апертуры голограммы  $S_{mn}$ , а так-

же дифракционной эффективности данного участка  $\eta_{mn}$ . Она может быть определена следующим образом:

$$i_{mn} = (S_{mn}/S_0)\eta_{mn}. \tag{20}$$

Если интенсивность точечного объекта принять равной  $i_p$ , а дифракционную эффективность соответствующего ему участка голограммы за  $\eta_p$ , то можно определить соотношение дифракционных эффективностей, требуемое для обеспечения одинаковой интенсивности восстановленных изображений двух объектов [15]:

$$\frac{\eta_{mn}}{\eta_p} = \frac{m^2 n^2 (2\lambda R_h + a_i^2)^2}{(2\lambda R_h + a_i^2 mn)^2 + 2\lambda a_i^2 R_h (m-n)^2}. \tag{21}$$

Из доступной литературы известно, что дифракционная эффективность отражательной дискретной бинарной рельефно-фазовой голограммы определяется величинами длины волны, высоты рельефа и скважности, связанными следующим выражением [16]:

$$\eta = (4/\pi^2) \sin^2(\pi S) \cdot \sin^2((2/\lambda)\pi h), \tag{22}$$

где  $S$  – скважность голограммы,  $h$  – высота ее рельефа. Если предположить, что высота рельефа выбрана оптимальной с точки зрения достижения максимальной дифракционной эффективности отражательной рельефно-фазовой голограммы, и равной  $\lambda/4$  [4], то (22) приобретёт следующий вид:

$$\eta = (4/\pi^2) \sin^2(\pi S). \tag{23}$$

В свою очередь, в соответствии с (23) получается, что если значения высоты рельефа и длины волны принять фиксированными, то скважность бинарной голограммы  $S$  остаётся единственным параметром, влияющим на значение её дифракционной эффективности. При этом на саму величину скважности непосредственно влияет выбор уровня бинаризации голограммы.

В качестве иллюстрации данного факта на рис. 6 представлено распределение интенсивности голографического поля двух объектов разной площади. Показана зависимость скважности от уровня бинаризации.

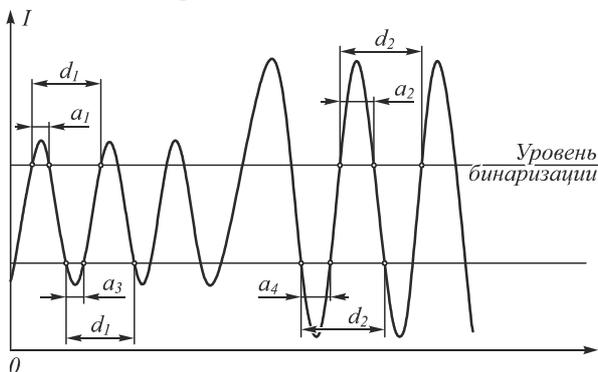


Рис. 6. Распределение интенсивности голографического поля двух объектов разной площади. Показана зависимость скважности от уровня бинаризации

Если такую голограмму бинаризовать по уровню, отмеченному на рисунке верхней чертой, то скважности двух участков апертуры полученной би-

нарной голограммы –  $S_1$  и  $S_2$  будут равны соответственно:

$$S_1 = a_1/d_1 \text{ и } S_2 = a_2/d_2, \tag{24}$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – локальные пространственные периоды голограммы.

Исходя из проведённого исследования, с учетом того, что скважность  $S_2$  по сравнению с  $S_1$  зависит от выбранного уровня бинаризации голограммы относительно слабо, можно сделать вывод о влиянии выбора уровня бинаризации голограммы на относительную интенсивность восстановленных с её помощью изображений. В соответствии с этим, чтобы получить изображение, наиболее близкое по распределению интенсивности к исходному объекту, следует подобрать оптимальный с этой точки зрения уровень бинаризации голограммы. Как видно из рис. 6, таких уровней в общем случае будет два.

Связь между качеством восстановленных изображений разновеликих объектов и уровнем бинаризации синтезированных голограмм-проекторов проиллюстрируем с помощью эксперимента. На рис. 7 приведены восстановленные изображения стандартного тестового объекта, полученные с помощью различных голограмм-проекторов.

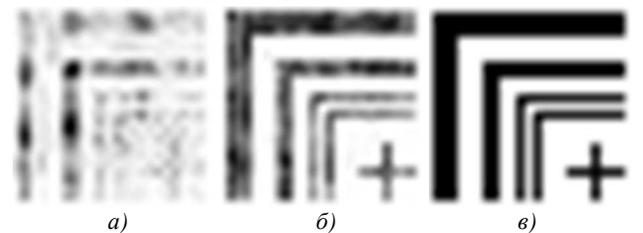


Рис. 7. Изображения тестового объекта, восстановленные с помощью голограмм, бинаризованных при среднем уровне бинаризации (а) и при оптимальном: до пороговой обработки (б) и после нее (в)

Первая из этих голограмм (рис. 7а) была бинаризована при среднем уровне бинаризации 128, равном половине от максимума интенсивности. Уровень бинаризации второй голограммы (рис. 7б) был определен экспериментально с точки зрения сглаживания интенсивности между разновеликими элементами восстановленных изображений и равен 87. Второй оптимальный уровень для голограммы данного объекта равен 56.

После проведения пороговой обработки изображение, восстановленное с помощью голограммы, бинаризованной при оптимальном уровне, полностью соответствует исходному объекту (рис. 7в), в то время как изображение на рис. 7а практически разрушено.

#### 4. Синтез голограмм-проекторов, предназначенных для восстановления трёхмерных изображений

Особенности изображающих свойств синтезированных голограмм позволяют формировать изображения на криволинейных поверхностях, что может быть использовано в том числе и в фотолитографическом процессе [17]. Неплоский объект можно представить в виде совокупности двумерных амплитудных бинарных

транспарантов, расположенных параллельно плоскости синтеза голограммы, на разном удалении от нее так, что геометрический центр каждого из них считается лежащим на нормали, восстановленной из центра голограммы. При этом расстояние между соседними транспарантами в получившемся наборе не должно превышать величины глубины резкости голограммы. Такое разбиение позволяет при помощи набора из стандартных плоских голограмм эмулировать запись голограммы, предназначенной для восстановления неплоского (трёхмерного) изображения.

Наиболее простой объект подобного рода представляет собой два расположенных параллельно друг другу плоских транспаранта, находящихся на разных расстояниях от плоскости голограммы (рис. 8).

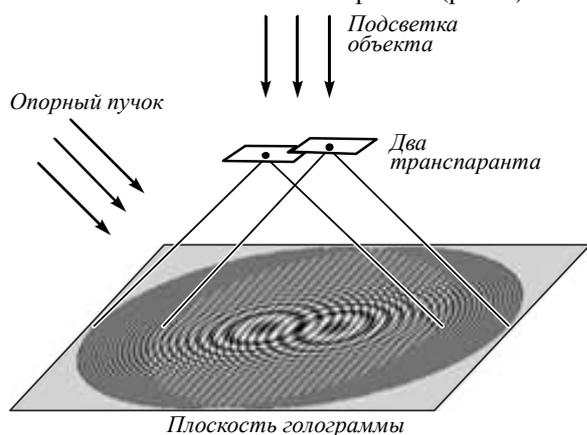


Рис. 8. Формирование голограммы неплоского объекта

В свою очередь, глубина резкости изображения не может превышать величины, определяемой следующим выражением [18]:

$$b = \pm(\lambda n / 2A^2), \quad (25)$$

где  $A$  – числовая апертура пучка;  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $n$  – показатель преломления среды между голограммой и фотошаблоном (в случае воздуха  $n = 1$ ). Числовая апертура излучения, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры фотошаблона, для рассматриваемого случая внеосевой голограммы с падающей под некоторым углом на плоскость синтеза голограммы плоской опорной волной, определяется выражением:

$$A = n \sin \alpha = \lambda / a_i. \quad (26)$$

Здесь  $a_i$  – минимальный по размеру элемент структуры фотошаблона, в частности, в качестве такового может приниматься размер одного пикселя дискретной голограммы;  $\alpha$  – апертурный угол дифрагировавшего излучения.

Работоспособность метода синтеза голограмм-проекторов Френеля, формирующих изображения на криволинейных поверхностях была проверена экспериментально, для чего был синтезирован и восстановлен ряд голограмм-проекторов. В качестве объекта были использованы два виртуальных двумерных транспаранта с изображением стандартного тестового объекта, расстояние между которыми составляло от 100 до 500 нм, с шагом 100 нм. При стандартных па-

раметрах синтеза глубина резкости восстановленного изображения, в соответствии с (25), должна соответствовать значению  $b = \pm 237$  нм. Каждая из голограмм восстанавливалась при двух значениях расстояния между ней и плоскостью регистрации изображения  $h_1$  и  $h_2$ , обуславливающих наилучшее восстановление изображения соответствующих транспарантов, составляющих неплоский объект. На рис. 9 представлены результаты проведённого исследования.

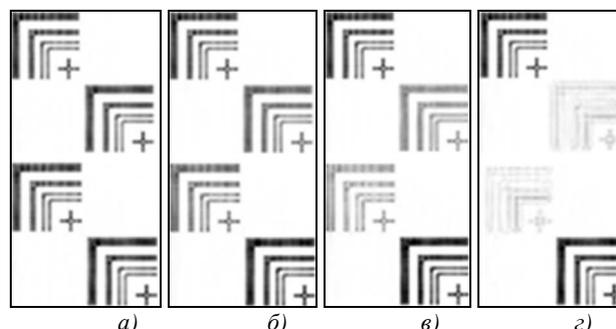


Рис. 9. Изображение в плоскости регистрации на удалении  $h_1$  (сверху) и  $h_2$  (снизу) при расстоянии между транспарантами, а) 100 нм друг от друга, б) 200 нм, в) 300 нм, г) 500 нм

Как видно, оба изображения остаются практически идентичными, пока расстояние между объектами при синтезе не превышает величину глубины резкости (рис. 9а, б). При увеличении расстояния качество одного из изображений постепенно начинает ухудшаться (рис. 9в) вплоть до его полного разрушения (рис. 9г).

### Заключение

Таким образом, в рамках работы проведено полное исследование основных изображающих свойств дискретных голограмм. Установлены требования к соотношениям между основными параметрами синтеза, или регистрации, голограммы: углом падения опорной волны  $\theta$ , рабочей длиной волны  $\lambda$ , минимальным размером элемента структуры объекта  $a_i$  и размером пикселя голограммы  $d_d$ . Соблюдение данных соотношений необходимо для восстановления качественного изображения с помощью дискретной голограммы. Помимо этого, рассмотрена возможность модификации структуры голограммы с целью смягчения установленных требований, а также возможность применения на практике присутствующих дискретным голограммам особенностей, таких как наличие эффекта подмены частот. Предложены способы практического применения данного эффекта.

Кроме того, исследованы влияние метода представления объекта, а также бинаризации голограммы на её изображающие свойства. Рассмотрены особенности изображающих свойств синтезированных голограмм для фотолитографии на криволинейных поверхностях. Установлены и экспериментально подтверждены соотношения, позволяющие эмулировать запись голограммы трёхмерного объекта при помощи набора из стандартных плоских голограмм.

Приведены результаты экспериментальных проверок всех установленных теоретических положений.

**Литература**

1. **Корешев, С.Н.** Использование метода голографии для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения / С.Н. Корешев, В.П. Ратушный // *Оптический журнал*. – 2004. – Т. 71, № 10. – С. 32-39.
2. **Lesem, L.B.** The kinoform: A new wavefront reconstruction device / L.B. Lesem, P.M. Hirsch, J.A. Jordan Jr. // *IBM Journal of Research and Development*. – 1969. – Vol. 13(2). – P. 150-155. – DOI: 10.1147/rd.132.0150.
3. **Кольер, Р.** Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин; пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 688 с.
4. **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.
5. **Корешев, С.Н.** Изображающие свойства дискретных голограмм. I. Влияние дискретности голограммы на восстановленное изображение / С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, Д.С. Смородинов // *Оптический журнал*. – 2014. – Т. 81, № 3. – С. 14-19.
6. *Оптика* / Г.С. Ландсберг. – Изд. 6-е, стер. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.
7. **Корешев, С.Н.** Дифракционная эффективность и некоторые особенности спектров дискретных амплитудных бинарных голограмм / С.Н. Корешев, Г.Б. Семёнов // *Оптика и спектроскопия*. – 1976. – Т. 41, № 2. – С. 310-313.
8. *Методы цифровой голографии* / Л.П. Ярославский, Н.С. Мерзляков. – М.: Наука, 1977. – 192 с.
9. **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. – DOI: 10.1016/j.optcom.2004.06.040.
10. **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.
11. *Методы анализа временных рядов: Учеб. пособие* / Н.А. Хованова, И.А. Хованов. – Саратов: Изд-во Гос. учеб.-науч. центра «Колледж», 2001. – 119 с. – ISBN: 5-900641-98-8.
12. **Корешев, С.Н.** Влияние метода представления объекта на изображающие свойства дискретных голограмм / С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, Д.С. Смородинов, А.Д. Громов // *Оптический журнал*. – 2015. – Т. 82, № 4. – С. 66-73.
13. **Johnson, S.** Stephen Johnson on Digital Photography / S. Johnson. – O'Reilly Media, Incorporated, 2003. – 320 p. – ISBN: 978-0-596-52370-1.
14. **Slinger, C.W.** Recent developments in computer-generated holography / C.W. Slinger, C.D. Cameron, S.D. Coomber, R.J. Miller, D.A. Payne, A.P. Smith, M.G. Smith, M. Stanley, P.J. Watson // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – Vol. 5290. – P. 27-41. – DOI: 10.1117/12.526690.
15. **Корешев, С.Н.** Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов / С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, Д.С. Смородинов, А.Д. Громов // *Оптика и спектроскопия*. – 2013. – Т. 114, № 2. – С. 318-323. – DOI: 10.7868/S003040341302013X.
16. **Корешев, С.Н.** Дифракционная эффективность дискретных бинарных фазовых голограмм / С.Н. Корешев // *Оптика и спектроскопия*. – 1978. – Т. 44, № 1. – С. 39-42.
17. **Корешев, С.Н.** Синтез голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях / С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, Д.С. Смородинов, А.Д. Громов // *Оптический журнал*. – 2015. – Т. 82, № 2. – С. 37-42.
18. *Прикладная оптика. Часть 2: Учебно-методическое пособие* / Г.И. Цуканова, Г.В. Карпова, О.В. Багдасарова, В.Г. Карпов, Е.В. Кривоустова, К.В. Ежова, под ред. А.А. Шехонина. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – 77 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 г. работал в ГОИ им. С.И. Вавилова. В 1986 году защитил кандидатскую диссертацию, в 2000 году – докторскую диссертацию. С 2006 года профессор кафедры прикладной и компьютерной оптики НИУ ИТМО. Автор более 80 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).

**Никаноров Олег Викторович**, кандидат технических наук, в 2006 году окончил факультет оптико-информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, в том же году поступил в аспирантуру. В 2011 году успешно защитил кандидатскую диссертацию. E-mail: [nikanorovov@gmail.com](mailto:nikanorovov@gmail.com).

ГРНТИ: 29.31.33.

Поступила в редакцию 8 августа 2016 г. Окончательный вариант – 1 ноября 2016 г.

## INFLUENCE OF THE DISCRETENESS OF SYNTHETIC AND DIGITAL HOLOGRAMS ON THEIR IMAGING PROPERTIES

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

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

**Abstract**

We study in which way the discreteness of synthetic and digital holograms affects their imaging properties, i.e. the structure and quality of the image under restoration. We establish and substantiate

requirements to the relationship between the basic parameters of synthesis or recording of a discrete hologram - operating wavelength, the angle of incidence of the reference wave, the size of the minimal object feature, and the hologram sampling period to ensure the matching between the object structures and the reconstructed image. We also examine the possibility of easing these requirements, provided either by modifying the structure of the hologram, or using a frequency substitution effect, characteristic of the discrete structures.

**Keywords:** holography, synthetic hologram, digital hologram, discrete structure, imaging properties, method of representation, binarization.

**Citation:** 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.

### References

- [1] Koreshev SN, Ratushnyj VP. Using the method of holography to obtain images of two-dimensional objects when solving problems of high-resolution photolithography. *J Opt Techn* 2004; 71(10): 673-679. DOI: 10.1364/JOT.71.000673.
- [2] Lesem LV, Hirsch PM, Jordan JA Jr. The kinoform: A new wavefront reconstruction device. *IBM Journal of Research and Development* 1969; 13(2): 150-155. DOI: 10.1147/rd.132.0150.
- [3] Collier RJ, Burkhardt ChB, Lin LH. *Optical holography*. Bell Telephone Laboratories; 1971.
- [4] 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 Techn* 2012; 79(12): 769-774. DOI: 10.1364/JOT.79.000769.
- [5] Koreshev SN, Nikanorov OV, Smorodinov DS. Imaging properties of discrete holograms. I. How the discreteness of a hologram affects image reconstruction. *J Opt Techn* 2014; 81(3): 123-127. DOI: 10.1364/JOT.81.000123.
- [6] Landsberg GS. *Optika* [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2003.
- [7] Koreshev SN, Semyonov GB. The diffraction efficiency and some of the features of the spectra of discrete holograms [In Russian]. *Optics and Spectroscopy* 1976; 41(2): 310-313.
- [8] Yaroslavsky LP, Merzlyakov NS. *Methods of digital holography* [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1977.
- [9] Zhang Y, Lu Q, Ge B. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography. *Optics communications* 2004; 240(4-6), 261-267. DOI: 10.1016/j.optcom.2004.06.040.
- [10] 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 Techn* 2014; 81(4): 204-208. DOI: 10.1364/JOT.81.000204.
- [11] Khovanova NA, Khovanov IA. *Methods of analysis of time series* [In Russian]. Saratov: "GosUNTs Kolledzh" Publisher; 2001.
- [12] Koreshev SN, Smorodinov DS, Nikanorov OV, Gromov AD. How the method of representing an object affects the imaging properties of synthesized holograms. *J Opt Techn* 2015; 82(4): 246-251. DOI: 10.1364/JOT.82.000246.
- [13] Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. O'Reilly Media, Incorporated; 2006. ISBN: 978-0-596-52370-1.
- [14] Slinger CW, Cameron CD, Coomber SD, Miller RJ, Payne DA, Smith AP, Smith MG, Stanley M, Watson PJ. Recent developments in computer-generated holography. *Proc SPIE* 2004; 5209: 27-41. DOI: 10.1117/12.526690.
- [15] Koreshev SN, Smorodinov DS, Nikanorov OV, Gromov AD. Intensity equalization for elements for binary-object images reconstructed using synthesized hologram projectors. *Optics and Spectroscopy* 2013; 114(2): 288-292. DOI: 10.1134/S0030400X13020136.
- [16] Koreshev SN. The diffraction efficiency of discrete binary phase holograms. *Optics and Spectroscopy* [In Russian], 1978, 44(1), 39-42.
- [17] Koreshev SN, Smorodinov DS, Nikanorov OV, Gromov AD. Synthesizing hologram-projectors for photolithography on nonplanar surfaces. *J Opt Techn* 2015; 82(2): 90-94. DOI: 10.1364/JOT.82.000090.
- [18] Shehonin AA, ed., Tsukanova GI, Karpova GV, Bagdasarova OV, Karpov VG, Krivopustova EV, Yezhova KV. *Applied Optics. Part 2: Study Guide* [In Russian]. Saint-Petersburg: "SPbGITMO (TU)" Publisher, 2003.

### Authors' information

**Sergey Nikolaevich Koreshev**, Doctor of Science in Engineering, graduated from the Faculty of Electrophysics LETI in «Electroacoustics and Ultrasonic Equipment» in 1974. From 1974 to 2000 he worked in the State Optical Institute. In 1986 he defended his Ph.D. thesis, in 2000 he defended a Doctor thesis. 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**, Ph.D 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 Ph.D thesis. E-mail: [smorodinov.denis@gmail.com](mailto:smorodinov.denis@gmail.com).

**Oleg Viktorovich Nikanorov**, Ph.D in Engineering, graduated from St.Peterburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics in 2006, majoring in Optical Technologies. In 2011 he defended his Ph.D thesis. E-mail: [nikanorovov@gmail.com](mailto:nikanorovov@gmail.com).

*Received August 8, 2016. The final version – November 1, 2016.*