

35. Компенсация эффекта близости в изображениях, восстановленных с помощью синтезированных голограмм Френеля

С. О. Старовойтов, С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов

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

Приведены результаты исследования влияния эффекта близости на изображение, восстанавливаемое с помощью синтезированных голограмм. Работа выполнена методом математического моделирования реальных физических процессов синтеза и восстановления голограмм бинарных транспарантов. Даны рекомендации по практическому применению метода компенсации эффекта близости.

Ключевые слова: голограмма, синтезированная голограмма, восстановление голограммы, фазовая коррекция, эффект близости.

Цитирование: **Старовойтов, С. О.** Компенсация эффекта близости в изображениях, восстановленных с помощью синтезированных голограмм Френеля / С. О. Старовойтов, С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 184–189.

Введение

Синтезированные с помощью компьютера голограммы имеют ряд отличий от голограмм, записываемыми традиционными методами [1, 2]. В частности, при их записи вместо реально существующих объектов применяются математические модели этих объектов. По этой причине синтезированные голограммы предоставляют широкие возможности для манипуляции формой представления объекта и параметрами схемы записи с целью влияния на изображающие свойства получаемых голограмм. В качестве примера можно привести работы [3, 4], в которых предложены методы устранения части интермодуляционных помех и увеличения глубины резкости в восстановленном изображении.

Одной из наиболее перспективных областей применения синтезированных голограмм является фотолитография. В первую очередь это обусловлено возможностью безабберационного восстановления больших по площади действительных изображений, в том числе и широко применяющихся в фотолитографии бинарных двумерных фотошаблонов-транспарантов [1, 5, 6]. Использование голограмм в проекционной фотолитографии также позволяет обойтись без применения многокомпонентных оптических систем, конструкция которых постоянно усложняется из-за существующей тенденции к уменьшению размеров электронных элементов.

Однако при изготовлении таких элементов возникают дополнительные дифракционные явления, одним из которых является эффект близости. Эффектом близости называется явление влияния вторичных дифракционных максимумов на качество близко расположенных

элементов изображения [7]. Предлагаемый метод фазовой коррекции эффекта близости аналогичен методу, известному из традиционной оптической фотолитографии: повышение разрешающей способности осуществляется за счет минимизации влияния вторичных дифракционных максимумов на качество восстановленного изображения. Для этого в пространстве предметов используются фазовые маски, которые обеспечивают противофазность волновых фронтов, формирующих изображения соседних элементов структуры объекта. При суперпозиции этих находящихся в противофазе волн в области между изображениями соответствующих элементов происходит деструктивная интерференция вторичных дифракционных максимумов, которая и повышает качество восстанавливаемого изображения. Поскольку синтез голограмм осуществляется в виртуальном пространстве, применение метода коррекции эффекта близости сводится к коррекции математической модели фотошаблона, т. е. введению необходимой фазовой модуляции в его функцию пропускания.

Экспериментальное исследование метода фазовой коррекции эффекта близости

Выясним границы применимости метода компенсации эффекта близости, т. е. условия, при которых элементы структуры фотошаблона могут считаться соседними и эффект близости начинает оказывать влияние на качество восстанавливаемого изображения с помощью численных экспериментов. Для их проведения был использован метод математического моделирования и специализированный комплекс синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов Френеля [8]. Методика работы включала в себя синтез и цифровое восстановление рельефно-фазовых голограмм нескольких плоских объектов-фотошаблонов. При их выполнении полагалось, что эффективность метода коррекции эффекта близости должна зависеть от ширины щелей и расстояния между ними.

Параметры синтеза голограмм выбирались исходя из требований, описанных в работах [1, 9]. Так, рабочая длина волны λ была выбрана равной 13,5 нм; размер пикселей объекта и голограммы d_d составлял 20×20 нм². При этом выбор размера пикселя объекта связан с требованиями соблюдения критерия Рэлея [9]. Угол падения параллельного опорного пучка при синтезе всех голограмм выбирался равным $14,7^\circ$, а расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы составляло $R_h = 20\ 345$ нм.

Исследование зависимости эффекта близости от расстояния между элементами структуры объекта проводилось путём синтеза и цифрового восстановления голограмм двух щелей (отрезков) размером 4×40 пикселей, т. е. 80×800 нм каждая, результаты которого приведены на рисунке 1 в виде графиков распределения интенсивности на восстановленных изображениях.

Согласно критерию Рэлея, два точечных источника, за которые в данном случае принимаются узкие щели, полностью разрешаются, если дифракционный максимум одного из них накладывается на дифракционный минимум другого. Поэтому в рамках экспериментов

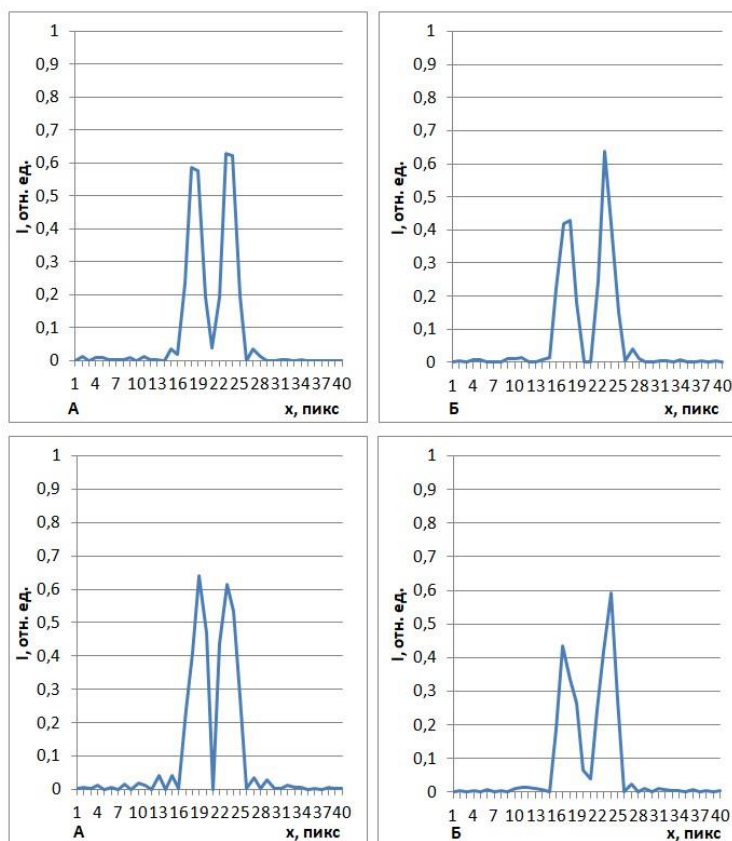


Рис. 1. Распределение интенсивности в изображениях, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при синфазном излучении от щелей (верхний ряд) и противофазном (нижний ряд) при расстояниях между щелями 20 нм (а) и 40 нм (б)

имеет смысл рассматривать только такие расстояния между щелями, при которых они не разрешаются по Рэлею при условии когерентного излучения. Для исследуемых щелей это расстояние равно 57 нм. Таким образом, расстояния между щелями в экспериментах составляли 1 и 2 пикселя, т. е. 20 и 40 нм. Для каждого из расстояний синтезировались две голограммы — одна для случая, когда падающее на щели излучение было синфазным, другая для случая, когда оно было в противофазе.

На представленных графиках на оси абсцисс отложены координаты в пикселях, а на оси ординат — доля от максимума интенсивности в соответствующем пикселе. Графики построены по тем строкам пикселей полученных изображений, где средняя интенсивность пикселей щелей минимальна. В используемой для отображения восстановленных изображений «серой шкале» [10], всего существует 256 возможных градаций интенсивности в изображении, где 0 соответствует чёрному цвету, то есть отсутствию интенсивности, а 255 — белому цвету, то есть максимальной интенсивности в изображении. Соответственно, чем больше количество уровней (градаций) пороговой обработки, при которых изображение соответствует исходному объекту, тем изображение можно считать более качественным [9]. Изображения, восстановленные с помощью голограмм, записанных при синфазности излучения, освещающего щели (т. е. без использования метода фазовой коррекции эффекта близости) соответствовали ис-



Рис. 2. Объект «Уголки»

ходным объектам в интервале 16 градаций пороговой обработки при расстоянии между щелями 20 нм и 20 градаций — при 40 нм. При противофазности излучения изображение соответствовало исходному объекту в интервале 36 градаций при расстоянии между щелями 20 нм и 18 градаций — при 40 нм. Таким образом, в случае минимально возможного расстояния между щелями (20 нм) наблюдается значительное увеличение числа градаций при пороговой обработке на восстановленном изображении в случае освещения щелей в противофазе, в том случае как при расстоянии между щелями в 40 нм его качество одинаково при использовании обеих методов синтеза. Сравнение представленных на рисунке 1 распределений интенсивности позволяет сделать вывод о том, что именно подавление шумов в пространстве между изображениями обеих щелей, вызванное наложением их центральных максимумов с обратным знаком, позволяет добиться увеличения качества получаемого изображения в случае использования метода фазовой коррекции эффекта близости.

Теперь рассмотрим, каким образом эффект близости проявляется в более сложных по структуре объектах. Для этого с помощью ранее упомянутого программного комплекса были синтезированы и восстановлены рельефно-фазовые отражательные голограммы-проекторы Френеля плоского объекта типа «Уголки», который показан на рисунке 2 и представляет собой крест толщиной в один пиксель и уголки толщиной от одного пикселя до трех пикселей. Расстояние между каждым из элементов объекта составляло один пиксель. В рамках исследования использовались следующие параметры объекта-транспаранта и схемы записи: рабочая длина волны λ была выбрана равной 13,5 нм; размер пикселей голограммы d_d составлял 20×20 нм², а размер пикселей объекта a_t — 80×80 нм². Угол падения опорной волны выбирался равным $14,7^\circ$, а расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы составляло $R_h = 20345$ нм. Таким образом, было синтезированы и восстановлены две голограммы рассматриваемого объекта «Уголки»: для случая полной синфазности излучения, освещающего все его элементы, и для случая, когда излучение, падающее на соседние элементы объекта, находилось в противофазе. На рисунке 3 в виде гистограмм представлены распределения интенсивности в восстановленных изображениях, взятые в строках пикселей, проходящих через горизонтальный элемент креста.

Как видно по полученным гистограммам, использование объекта, в котором соседние элементы подсвечиваются в противофазе, позволяет добиться увеличения качества восстанавливаемого изображения. Изображение транспаранта, освещаемое при полной синфазности падающего на него излучения, соответствовало исходному объекту на протяжении 41 градации, а при подсветке близко расположенных его элементов в противофазе — на протяжении 68 градаций. По графикам распределения интенсивности заметно, что во втором случае

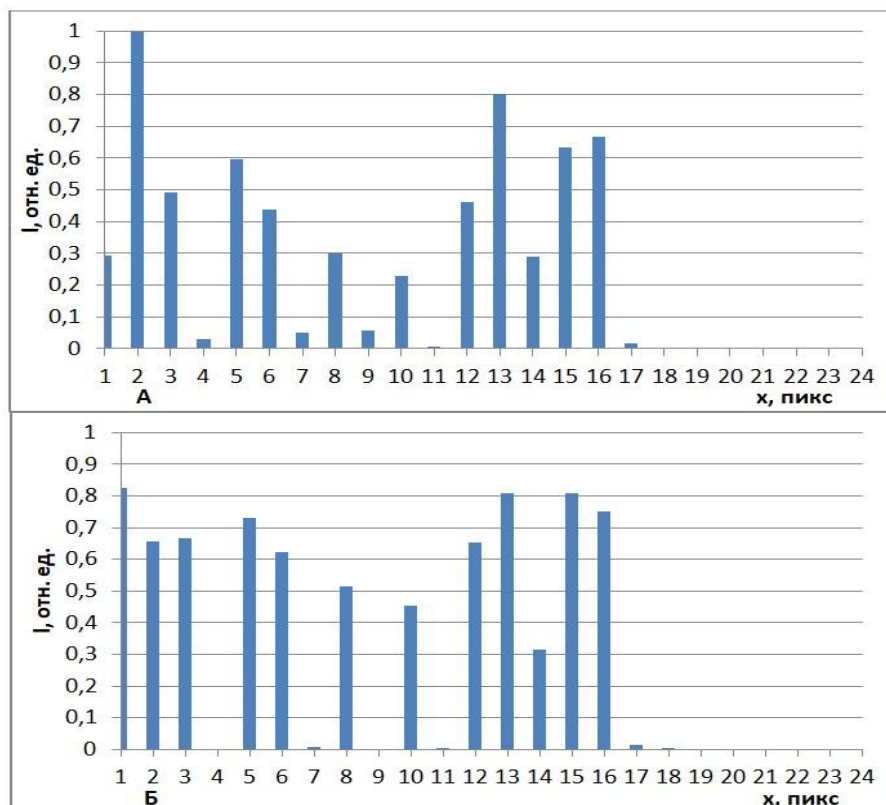


Рис. 3. Распределение интенсивности в изображении объекта «Уголки», восстановленного с помощью голограмм, синтезированных при синфазности освещения соседних элементов объекта (а) и противофазе (б)

происходит почти полное подавление шумов в пространстве между элементами объекта. Особенно ярко это видно на примере узких щелей (элементы 8 и 10 графиков).

Заключение

В результате проведения численных экспериментов показано, что при восстановлении изображений с помощью синтезированных голограмм известный из фотолитографии метод компенсации эффекта близости положительно влияет на разрешение в восстановленном изображении. Эффект близости наиболее явно проявляется при малых расстояниях между элементами изображений — не более одного пиксела, вне зависимости от размера самого пиксела и структуры рассматриваемого объекта-фотошаблона. Эффективность метода продемонстрирована с помощью математического моделирования процессов синтеза и восстановления двумерных амплитудных и рельефно-фазовых отражательных голограмм-проекторов Френеля.

Список источников

- [1] **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. — Том 40. — № 6. — С. 793–801.

- [2] **Martinez-Leon, L.** Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination / L. Martinez-Leon, P. Clemente, Yutaka Mori, V. Climent, J. Lancis, E. Tajahuerce. — 2017. — Vol. 25. — № 5. — P. 4975–4984.
- [3] **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.
- [4] **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. — Том 85. — № 11. — С. 50–57.
- [5] **Maiden, A.** Nonplanar photolithography with computer-generated holograms / A. Maiden, R. McWilliam, A. Purvis, S. Johnson, G. L. Williams, N. L. Seed, A. P. Ivey // Opt. Lett. — 2005. — Vol. 30. — № 11. — P. 1300–1302.
- [6] **Bay, C.** Maskless photolithography via holographic optical projection / C. Bay, N. Hübner, J. Freeman, T. Wilkinson // Opt. Lett. — 2010. — Vol. 35. — № 13. — P. 2230–2232.
- [7] **Моро, У.** Микролитография. — М.: Мир, 1990. — 1240 с.
- [8] **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. — Том 79. — № 12. — С. 30–37.
- [9] **Корешев, С. Н.** Влияние метода представления объекта на изображающие свойства синтезированных голограмм / С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, О. В. Никаноров // Оптический журнал. — 2015. — Том 82. — № 4. — С. 66–73.
- [10] **Johnson, S.** Stephen Johnson on Digital Photography. — USA, Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Incorporated, 2006. — 305 p.