

## Метод компьютерного синтеза и проекционной записи микроголограмм для систем голографической памяти: математическое моделирование и экспериментальная реализация

А.Ю.Бетин, В.И.Бобринёв, Н.Н.Евтихийев, А.Ю.Жердев, Е.Ю.Злоказов, Д.С.Лушников, В.В.Маркин, С.Б.Одинокоев, С.Н.Стариков, Р.С.Стариков

*Представлен метод компьютерного синтеза и проекционной записи микроголограмм для систем голографической памяти, приведены результаты математического моделирования и экспериментальной реализации метода.*

**Ключевые слова:** голографические запоминающие устройства, компьютерно-синтезированная голограмма, пространственно-временной модулятор света.

Разработка методов компактного и долгосрочного хранения данных является одной из важнейших проблем современных информационных технологий. Применение голографических методов для задач долговременного хранения данных потенциально позволяет достичь высоких информационной ёмкости и скорости записи/считывания информации, а также имеет ряд других известных преимуществ. В настоящее время известно большое количество работ в данной области; значительная часть новейших исследований носит прикладной характер, имеются сведения о ряде попыток коммерциализации систем голографической памяти [1–10]. В настоящей работе представлен метод формирования микроголограмм, сочетающий компьютерный расчёт голограмм и их проекционную запись на фоточувствительный носитель.

Как правило, в системах голографической памяти используется «классический» подход, состоящий в фиксации интерференционной картины между когерентными предметной и опорной волнами. Мы же в качестве альтернативы интерференционной записи голограмм предлагаем использовать компьютерный синтез голограмм. В этом случае численно рассчитывается (синтезируется) голограмма с откликом, соответствующим требуемой странице данных. Синтезированная голограмма представляется в виде цифрового изображения, которое с помощью пространственно-временного модулятора света (ПВМС) непосредственно проецируется на голографический носитель; после экспонирования в носителе формируется дифракционная структура с желаемыми характеристиками, обеспечивающими восстановление изображения исходной страницы данных. Преимущество такого подхода заключается в отсутствии необходимости использования

интерференционных схем голографической записи, что позволяет существенно упростить систему в целом.

В системах голографической памяти объектом для записи является двумерный массив бинарных элементов – страница двоичных данных со специальными реперными точками, выполняющими техническую роль при считывании. В настоящее время организация данных страницы голографической памяти регламентируется международным стандартом ЕСМА-377 [11]. Особенностью такого объекта является то, что каждый его пиксел несёт определённую информацию, поэтому в восстановленном изображении требования к возможностям корректной сортировки и локализации его «чёрных» и «белых» элементов весьма высоки.

Пример страницы данных с  $6 \times 6$  информационными блоками представлен на рис.1. Далее в исследованиях использовались страницы такого размера. Компьютерный синтез голограммы Фурье реализован стандартным образом, расчёты проводились с применением известных методов подавления нулевого порядка и добавления случайной фазовой маски [12, 13]. Последний метод был оптимизирован с учётом распределения «чёрных» и «белых» элементов записываемых объектов. Результат компьютерного расчёта – амплитудная голограмма – представлена в виде полутонового растрового изображения. На рис.2 показан пример фрагмента рассчитанной голограммы Фурье, а на рис.3 приведено распределение светового поля, численно восстановленное с этой голограммы. Восстановленное поле представляет собой три пространственно разделённые области, содержащие  $\delta$ -функцию в нулевом

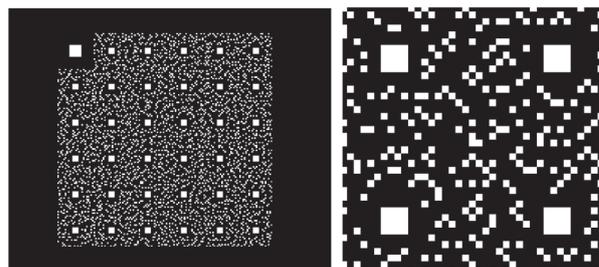


Рис.1. Страница двоичных данных (слева – полный вид страницы с  $6 \times 6$  информационными блоками, справа – увеличенный фрагмент).

А.Ю.Бетин, В.И.Бобринёв, А.Ю.Жердев, Д.С.Лушников, В.В.Маркин, С.Б.Одинокоев. НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5  
Н.Н.Евтихийев, Е.Ю.Злоказов, С.Н.Стариков, Р.С.Стариков. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31;  
e-mail: evtikhiev@mail.ru, rstarikov@mail.ru

Поступила в редакцию 22 июня 2012 г., после доработки – 16 ноября 2012 г.

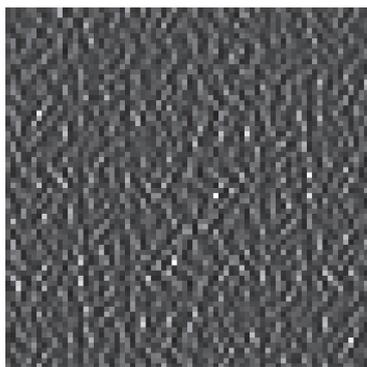


Рис.2. Увеличенный фрагмент синтезированной фурье-голограммы.

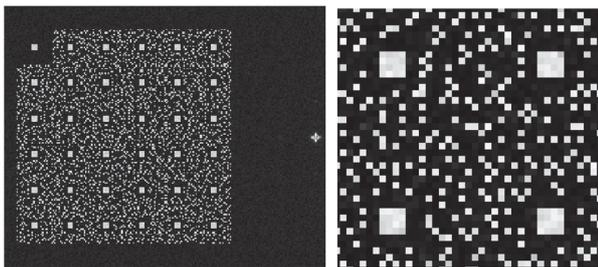


Рис.3. Результат численного восстановления отклика голограммы. Слева – вид 0-го и 1-го дифракционных порядков, справа – увеличенный фрагмент 1-го дифракционного порядка.

порядке и два сопряжённых изображения записанного объекта в  $\pm 1$ -х дифракционных порядках. Модельные расчёты для голограмм Фурье показали их пригодность для записи страниц двоичных данных. Рассчитанные голограммы обеспечили отношение интенсивностей 0-го и 1-го дифракционных порядков на уровне  $10^4$  без использования случайных фазовых масок и на уровне  $10^3$  в случае их использования. Поскольку реальные пространственно-временные модуляторы света и голографические носители обладают ограниченным динамическим диапазоном модуляции, было проведено моделирование ограничений динамического диапазона модуляции синтезированной фурье-голограммы, которое показало, что необходимо использовать не менее 6–8 уровней пропускания. Установлено, что наилучшее качество восстановленного объекта достигается при добавлении случайных фазовых масок.

Были проведены эксперименты по реализации синтезированных фурье-голограмм и по восстановлению с них страниц данных. Для ввода проецируемого изображения использовался жидкокристаллический ПВМС Holoeye LC-R1080, работающий в режиме модуляции интенсивности на просвет (размер пиксела модулятора 32 мкм, размерность модулятора  $1024 \times 768$  пикс.). Проекция осуществлялась на высокоразрешающие фотографические пластинки ПФГ-01 и ПФГ-03, фоточувствительный слой которых представляет собой фотоэмульсию на основе галогенидов серебра. Разрешающая способность эмульсии ПФГ-01 равна 3000 лин./мм, а эмульсии ПФГ-03 – 10000 лин./мм, этого более чем достаточно для записи на эмульсиях спроецированных изображений рассчитанных голограмм.

Исследовались два способа проекционной записи: с использованием когерентного источника излучения (лазера) и некогерентного источника (светодиода). Сравни-

тельный анализ изображений, восстановленных с голограмм, полученных при когерентной и некогерентной проекции, показал, что принципиального различия в качестве изображений нет. При когерентной проекции отмечен несколько более высокий уровень пространственного шума, что, однако, при равных имеющихся возможностях сортировки «чёрных» и «белых» элементов не сказывается на результате считывания.

Результаты экспериментальной реализации голограмм Фурье с ограничениями динамического диапазона пропускания подтвердили результаты численного моделирования, указывающие на необходимость использования не менее 6–8 градаций пропускания голограммы, что для существующих в настоящее время пространственно-временных модуляторов света не является жёстким требованием.

Восстановленное изображение с фурье-голограммы, полученной по схеме некогерентной проекции на фоточувствительный носитель с двадцатикратным уменьшением апертуры ЖК модулятора, показано на рис.4. Видно, что несмотря на заметные искажения формы реперных точек и информационных битов, контраст и геометрия восстановленного изображения страницы данных обеспечивают соответствие результата считывания записанной странице.

Таким образом, представлен метод компьютерного синтеза и проекционной записи микроголограмм для систем голографической памяти, приведены соответствующие результаты математического моделирования и экспериментальной реализации метода. По нашему мнению, применение метода позволяет, при прочих равных условиях, кардинально снизить требования к оптическим и оптико-электронным узлам систем голографической памяти за счёт замены интерференционной записи голограмм на проекционную запись численно синтезированных голограмм. Скорость расчёта голограмм при использовании современных вычислительных средств может быть весьма высокой и достигать, по самым сдержанным оценкам, тысяч страниц в секунду.

Проведенные оценки информационной ёмкости фурье-голограмм, учитывающие особенности их расчёта и специфику представления страниц данных (размеров реперных точек, пространственной скважности элементов и др.), показали, что при использовании имеющегося пространственно-временного модулятора света с размерностью  $1024 \times 768$  пикс. максимально возможное количество записываемой/считываемой информации составляет  $\sim 50$  Кбайт (тогда как размерности передовых современных коммерчески доступных модуляторов могут обеспечить вывод до 200 Кбайт информации). Очевидно, что

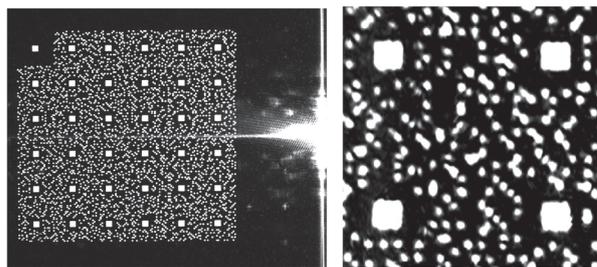


Рис.4. Результат экспериментального восстановления отклика голограммы. Слева – вид 0-го и 1-го дифракционных порядков, справа – увеличенный фрагмент 1-го дифракционного порядка.

принципиальным фактором, ограничивающим характеристики записи данных при использовании обсуждаемого метода, помимо разрешающей способности голографического носителя и параметров оптических систем, является также размерность используемого пространственно-временного модулятора света. Поскольку размеры голограмм, спроецированных на фоточувствительную среду, могут составлять величины порядка квадратных миллиметров, то у фоточувствительных материалов остаётся существенный «запас» по разрешению, и, вероятно, возможно применение методов мультиплексной записи голограмм, однако этот вопрос требует отдельного обсуждения.

1. Микаэлян А. *Оптические методы в информатике* (М.: Наука, 1990).

2. Coufal H., Psaltis D., Sincebox G. *Holographic Data Storage* (Heidelberg: Springer, 2000).
3. Hesselink L., Orlov S., Bashaw M. *Proc. IEEE*, **92**, 1231 (2004).
4. Horimai H., Tan X. *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 943 (2007).
5. *Proc. ODS '09 Optical Data Storage Topical Meeting* (Lake Buena Vista, FL, USA, 2009).
6. Optical Data Storage 2009. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7505** (2009).
7. *Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems*. Curtis K., Dhar L., Hill A., Wilson W., Ayres M. (Eds) (Chichester, U.K.: Wiley, 2010)
8. Cherubini G., Chung Ch., Messner W., Reza Moheimani S. *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, **20**, 296 (2012).
9. <http://www.inphase-technologies.com/>, (14.11.2012).
10. <http://hvault.com/>, (14.11.2012)/
11. Standard ECMA-377 (2007).
12. Brown B., Lohmann A. *IBM J. Res. Dev.*, **13**, 160 (1969).
13. Dallas W., in *The Computer in Optical Research*. Ed. by B.Frieden (Berlin: Springer-Verlag, 1980, pp 291–366).