

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2009, том 45, № 1

УДК 681.327.68 : 778.38

**МОДИФИКАЦИЯ СИГНАЛЬНОГО КАНАЛА
СТРАНИЧНО ОРГАНИЗОВАННОЙ
ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ***

Е. Ф. Пен

*Институт автоматки и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: pen@iae.nsk.su*

Предложен, теоретически и экспериментально исследован модифицированный вариант сигнального канала голографической памяти, обеспечивающий в сравнении с традиционной оптической схемой уменьшение разброса полезного сигнала восстановленных изображений информационных элементов, вызванного их интерференционным взаимодействием при ограничении апертуры фурье-голограмм, повышение отношения сигнал/фон, уменьшение критичности совмещения изображения с фотоприемной матрицей.

Ключевые слова: голографическая память, оптическая система, восстановленное изображение.

Введение. Современные проекты голографической памяти основаны на известной оптической схеме сигнального канала, содержащей в качестве формирователя страниц данных двумерный пространственный модулятор света, объединенный с фазовой маской, и матричный фотоприемник для их считывания. В такой схеме при уменьшении апертуры фурье-голограмм (в целях повышения плотности записи) возникают размытие изображений информационных элементов, их когерентное взаимодействие, приводящее к значительному разбросу интенсивности и ухудшению контраста, что в конечном итоге порождает ошибки при их считывании.

Оптимизации геометрических параметров сигнального канала посвящены работы [1, 2]. Известны также методы пред- и постобработки изображений страниц данных и коррекции ошибок считывания [3], требующие значительных аппаратных и временных затрат, а также избыточности записываемой информации. В настоящее время поиск методов повышения качества записи и достоверности считывания информации в голографической памяти по-прежнему актуален.

* Работа выполнена при поддержке интеграционных проектов СО РАН № 17 и № 71 и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-07-89144).

Цель предлагаемой работы – показать влияние модификации и оптимизации оптической схемы сигнального канала голографической памяти на улучшение характеристик восстановленных изображений страниц данных в сравнении с традиционной схемой. Исследовано влияние размера апертуры фурье-голограмм на разброс полезного сигнала восстановленных изображений информационных элементов, отношение сигнал/фон, критичность совмещения изображения с фотоприемной матрицей при различных сценариях результирующей плотности записи и коэффициента полезного использования величины оптического сигнала.

В данной работе не изучаются другие факторы, влияющие на качество восстановленного изображения (несовершенство регистрирующей среды, характеристики модуляторов света и фотоприемников). Эти вопросы детально исследованы в [4, 5].

Традиционная схема сигнального канала голографической памяти.

В традиционной оптической схеме (рис. 1) голографической памяти [1] регистрируемая информация представлена в плоскости P с использованием пространственного модулятора света 1 в виде изображения двумерного массива размером $N \times N$ прозрачных и непрозрачных ячеек информационных элементов площадью $a_p \times a_p$, расположенных с шагом b и соответствующих двоичным информационным элементам «1» и «0». Это изображение с помощью линзы 2 подвергается пространственному фурье-преобразованию, и в результате интерференции с опорным пучком в плоскости H регистрируется голограмма. На этапе считывания голограммы посредством линзы 3 проводится обратное фурье-преобразование и формируется восстановленное изображение страницы данных, которое детектируется в плоскости D с использованием матрицы фотоприемников 4 площадью $d_D \times d_D$, расположенных с шагом b . В этой схеме каждый информационный элемент представлен одной ячейкой модулятора света и считывается одним фотоприемником.

Поверхностная плотность записи информации в такой схеме имеет вид

$$\rho = N^2/h^2, \quad h = \beta 2\lambda F/a_p.$$

Диаметр голограммы h выбирается исходя из допустимой степени искажений восстановленных изображений информационных элементов вследствие их дифракционного размытия, вызванного ограничением апертуры фурье-голограммы [6]; β – параметр, характеризующий степень ограничения фурье-спектра и соответствующего уширения размера изображения информационных элементов в плоскости D (при $\beta = 1$ диаметр голограммы равен размеру центрального максимума фурье-спектра); λ – длина волны излучения лазера; F – фокусное расстояние линз 2 и 3.

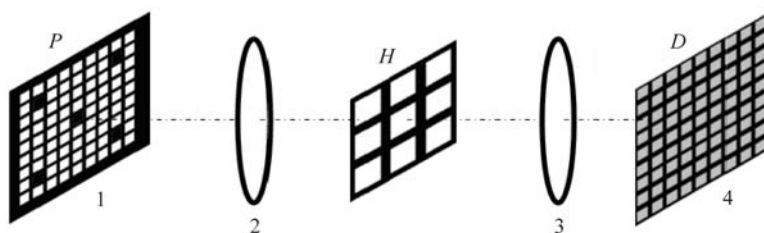


Рис. 1

Известно, что пространственное распределение интенсивности света фурье-спектра регулярного массива прозрачных ячеек имеет вид резких пиков с большим перепадом интенсивности, значительно превышающим динамический диапазон реальных регистрирующих сред. Для выравнивания такого распределения интенсивности света применяется рандомизирующая фазовая маска, совмещенная с пространственным модулятором света [7]. Количество градаций и конфигурации значений фазы в ячейках определяют степень интерференционного взаимодействия изображений соседних информационных элементов.

Предположим, что амплитуда изображения каждого из информационных ν, μ -элементов описывается гауссовой функцией, тогда восстановленное изображение страницы данных можно записать как

$$U_D(x, y) = \sum_{\nu, \mu} A_{\nu, \mu} \exp(i\psi_{\nu, \mu}) \exp\left(-\frac{(x - \nu b)^2}{a_D^2} - \frac{(y - \mu b)^2}{a_D^2}\right),$$

где $\psi_{\nu, \mu}$ – значение фазы в ν, μ -ячейке фазовой маски, a_D – радиус изображения информационного элемента в плоскости фотоматрицы по уровню $1/e^2$ интенсивности. На рис. 2, *a* показана расчетная трехмерная картина одной из возможных реализаций распределения интенсивности изображения массива размером 3×3 информационных элемента «1», окружающих информационный элемент «0», а на рис. 2, *b, c* представлены центральные сечения распределений интенсивностей комбинаций информационных элементов «111» и «101».

Видно, что изображения элементов размыты, неоднородны и пересекаются друг с другом, что вызывает их интерференционное взаимодействие и, как следствие, разброс мощностей изображений информационных элементов.

Расчеты показывают, что мощности оптических сигналов (суммарные значения интенсивностей по площади фотоприемника $d_D \times d_D$) обладают следующими статистическими харак-

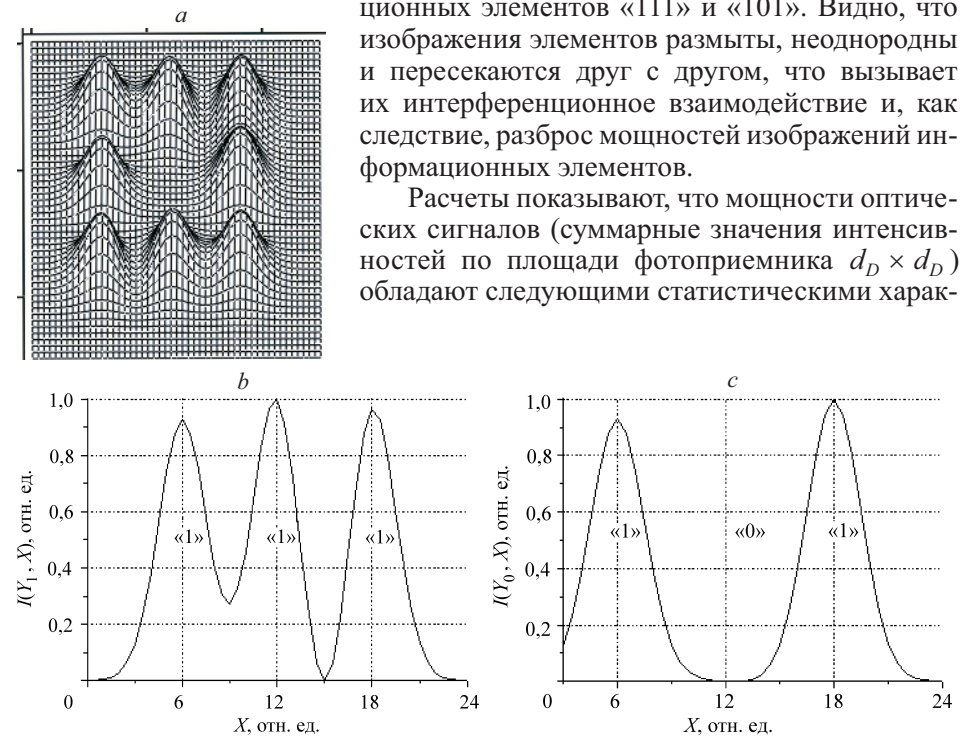


Рис. 2

теристиками: $\bar{P}_1 = 1,0$, $\bar{P}_0 = 0,17$, $K = 6:1$, $\sigma_1 = 0,03$, $\sigma_0 = 0,5$, где $\bar{P}_{1,0}$, $K = \bar{P}_1/\bar{P}_0$, $\sigma_{1,0} = \sqrt{D_{1,0}}/\bar{P}_{1,0}$ – соответственно относительные средние значения, контраст и относительное среднеквадратическое отклонение (СКО) мощностей изображений информационных элементов «1» и «0» (по массиву размером 3×3 информационных элемента и их комбинациям). В расчетах предполагалось, что $a_D = 0,5b$, $d_D = b$, максимальные относительные интенсивности элементов «1» и «0» в исходном изображении страницы данных составляют соответственно 1 и 0,01, комбинация фаз в ячейках четырехуровневой маски имеет следующий вид: $3\pi/2, \pi, \pi/2, \pi/2, 0, \pi, 3\pi/2, \pi/2, 0$ (нумерация ячеек производится слева направо и снизу вверх).

При сдвиге восстановленного изображения в плоскости D относительно фотоматрицы на величину $\pm 15\%$ от размера d_D (в диагональном направлении) характеристики мощностей оптических сигналов составляют $\sigma_1 = 0,094$, $K = 3,4:1$, т. е. разброс мощностей информационных элементов увеличивается в 3 раза, а контраст уменьшается почти в 2 раза, что указывает на высокую критичность совмещения изображения и фотоматрицы в данной схеме.

Модифицированный формат страницы данных. Статистические характеристики изображения страницы данных, особенно $\sigma_{1,0}$, зависят от степени размытия распределения интенсивности «1» и разницы фаз соседних информационных элементов. Зависимость σ_1 от относительного размера информационного элемента a_D/b при площади фотоприемников $d_D \times d_D = b \times b$ и подобранной комбинации значений фаз в ячейках массива размером 3×3 информационных элемента традиционного формата страницы данных изображена на рис. 3. Видно, что вначале с ростом a_D/b разброс мощностей изображений «1» с учетом взаимодействия с соседними элементами возрастает и достигает некоторого максимума, после которого снижается до весьма малой величины (порядка $\sigma_1 = 0,003$). Такое поведение можно объяснить изменением вклада интенсивностей соседних элементов в этот разброс по мере роста параметра a_D/b (вначале вклад мал, поэтому и разброс мощностей изображений «1» незначительный; затем интенсивности «хвостов» соседних элементов становятся сопоставимыми с интенсивностями самих исследуемых элементов, и при этом разброс мощностей изображений «1» макси-

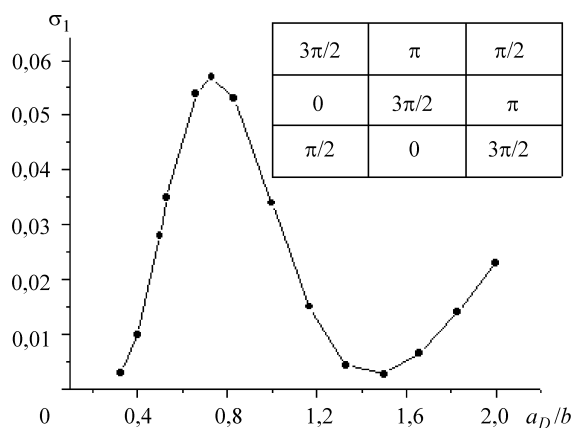


Рис. 3

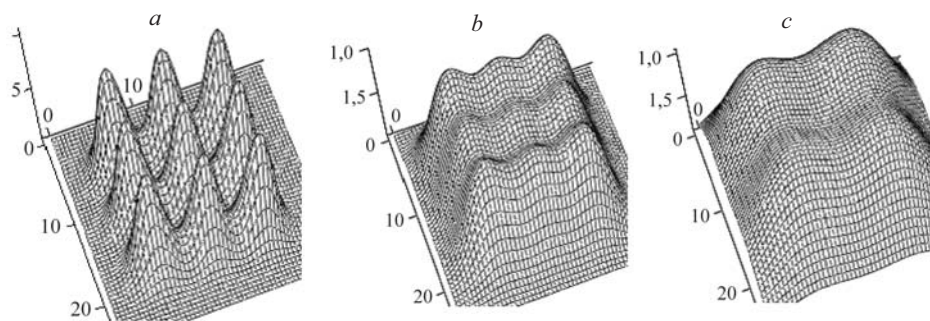


Рис. 4

мален; при дальнейшем росте параметра a_D/b изображения отдельных элементов сливаются в одно световое пятно со сравнительно равномерным распределением интенсивности).

На рис. 4, *a–c* показана трансформация распределения интенсивности изображения массива размером 3×3 информационных элемента «1» при постепенном уширении изображения отдельного элемента ($a_D = 0,5b$ (*a*), $a_D = 0,8b$ (*b*), $a_D = 1,5b$ (*c*)), которое происходит вследствие уменьшения апертуры фурье-голограммы. Видно, что для $a_D = 1,5b$ отдельные информационные элементы «1» этого массива малоразличимы.

Это обстоятельство приводит к мысли о целесообразности изменения формата страницы данных, а именно представлении информационного элемента «1» нового формата не одной ячейкой пространственного модулятора света, а массивом размером 3×3 ячейки и детектировании массивом фотоприемников, например, размером 3×3 .

Отмеченная конфигурация значений фаз в ячейках массива размером 3×3 информационных элемента традиционного формата страницы данных подобрана эмпирически и обеспечивает малый разброс мощностей изображений такого массива элементов. Конфигурацию размером 3×3 ячейки традиционной фазовой маски можно рассматривать как одну ячейку фазовой маски нового формата.

Для обеспечения малого разброса мощностей изображений информационных элементов нового формата другие ячейки этой маски следует формировать аналогично маске в традиционной схеме, что можно получить добавлением значений фазы $\pi/2$, либо $3\pi/2$, либо π ко всем ячейкам подобранной ранее конфигурации фазовой маски, а также ее поворотом на $\pm 90^\circ$. При этом для соседних информационных элементов нового формата полученные конфигурации ячеек фазовой маски должны отличаться во избежание синфазной интерференции, усиливающей разброс мощностей выходного изображения.

Пример необходимой конфигурации ячеек фазовой маски для массива размером 3×3 информационных элемента нового формата приведен в табл. 1.

Характеристики изображения модифицированной страницы данных. Рассмотрим более подробно структуру модифицированной страницы данных и характеристики ее восстановленного изображения. Трехмерное расчетное изображение распределения интенсивности восстановленного изображения массива из восьми информационных элементов «1» нового формата, окружающего информационный элемент «0», показано на рис. 5, *a*. Центральные сечения распределений интенсивностей комбинаций инфор-

Таблица 1

π	$\pi/2$	0
$3\pi/2$	π	$\pi/2$
0	$3\pi/2$	π

$\pi/2$	0	$3\pi/2$
π	$\pi/2$	0
$3\pi/2$	π	$\pi/2$

0	$3\pi/2$	π
$\pi/2$	0	$3\pi/2$
π	$\pi/2$	0

$3\pi/2$	π	$\pi/2$
0	$3\pi/2$	π
$\pi/2$	0	$3\pi/2$

0	$\pi/2$	π
$\pi/2$	π	$3\pi/2$
π	$\pi/2$	0

$\pi/2$	0	$3\pi/2$
π	$\pi/2$	0
$3\pi/2$	π	$\pi/2$

0	$3\pi/2$	π
$\pi/2$	0	$3\pi/2$
π	$\pi/2$	0

$3\pi/2$	π	$\pi/2$
0	$3\pi/2$	π
$\pi/2$	0	$3\pi/2$

π	$\pi/2$	0
$3\pi/2$	π	$\pi/2$
0	$3\pi/2$	π

мационных элементов «11» и «101» представлены на рис. 5, *b*, *c*. Видно, что изображения информационных элементов размыты, имеют неоднородные участки, пересекаются друг с другом, но вместе с тем, как показывают расчеты, обладают характеристиками, свидетельствующими о хорошем качестве изображения в целом: $\bar{P}_1 = 1,0$, $\bar{P}_0 = 0,076$, $K = 13:1$, $\sigma_1 = 0,012$, $\sigma_0 = 0,450$. При расчетах предполагалось, что максимальные относительные интенсивности элементов «1» и «0» в исходном изображении страницы данных составляют соответственно 1 и 0,01, $a_D = 1,5b$, площадь фотоприемников $3b \times 3b$, шаг их размещения $4b$ (соответственно шаг размещения массивов размером 3×3 ячейки модулятора света также $4b$). Сравнивая эти данные с характеристиками в традиционной схеме,

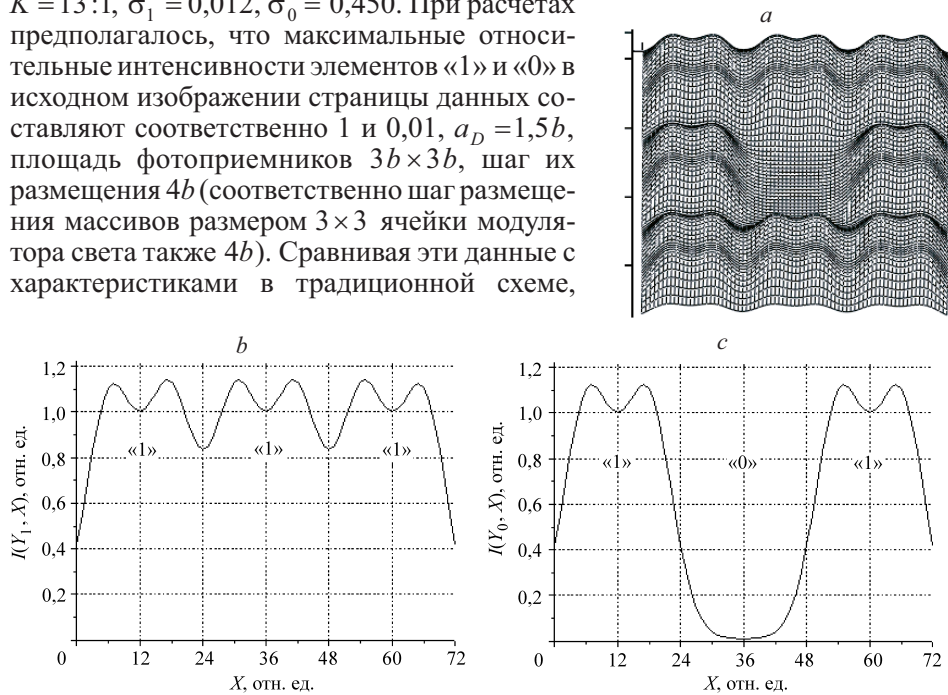


Рис. 5

можно видеть, что контраст повышается в 2 раза, а разброс мощностей изображений «1» уменьшается в 2,5 раза.

Как и в рассмотренном случае, предположим, что изображение страницы данных смещено в плоскости фотоприемников в диагональном направлении на $\pm 15\%$ от размера d_D . Расчеты показывают, что характеристики изображения страницы нового формата изменятся следующим образом: $K = 12 : 1$, $\sigma_1 = 0,015$, что указывает на слабую критичность юстировки изображения в этой схеме.

Следует отметить, что при указанных параметрах нового формата страницы данных плотность записи ниже, чем в традиционной схеме в $(4/3)^2$ раза, т. е. примерно на 40%. Сохранить исходную плотность записи и слабую критичность юстировки изображения можно при площади фотоприемников $2b \times 2b$ и шаге их размещения $3b$, однако, как показывают расчеты, СКО мощностей изображений «1» и контраст мощностей изображений «1» и «0» оказываются сопоставимыми с характеристиками традиционной схемы, а уровень полезного сигнала уменьшается в 2 раза.

Компромиссным является вариант, при котором площадь фотоприемников составляет $2b \times 2b$, а шаг их размещения $3,5b$. В этом случае характеристики выходного изображения страницы данных достаточно высокие, а потеря плотности записи незначительная.

Сравнительные расчетные характеристики изображений страниц данных в зависимости от шага размещения и площади фотоприемников применительно к описанным выше ситуациям приведены в табл. 2. Видно, что последний из рассмотренных вариантов является предпочтительным.

Экспериментальные исследования. Характеристики изображения модифицированной страницы данных исследованы также экспериментально.

Т а б л и ц а 2

Расчетные параметры	Шаг размещения			
	b	$4b$	$3b$	$3,5b$
Шаг размещения фотоприемников	b	$4b$	$3b$	$3,5b$
Площадь фотоприемников	$b \times b$	$3b \times 3b$	$2b \times 2b$	$2b \times 2b$
Плотность записи (относительно традиционной схемы)	1,0	0,56	1,0	0,77
Мощность полезного сигнала, отн. ед.	1,0	1,0	0,5	0,5
Контраст мощностей изображений «1» и «0»	6 : 1	13 : 1	5 : 1	10 : 1
СКО мощностей изображений «1»	0,028	0,012	0,029	0,016
Контраст мощностей изображений «1» и «0» при сдвиге изображения страницы на $\pm 15\%$ от размера фотоприемника	3,4 : 1	12 : 1	4 : 1	9 : 1
СКО мощностей изображений «1» при сдвиге изображения страницы на $\pm 15\%$ от размера фотоприемника	0,094	0,015	0,044	0,022

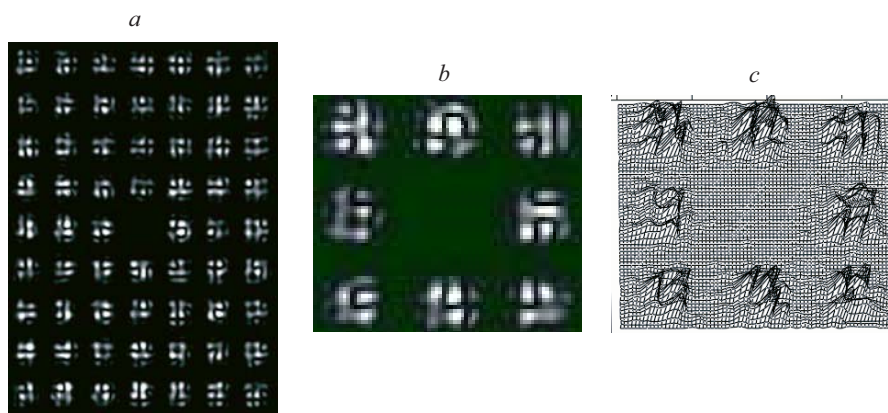


Рис. 6

Информационные элементы «1» состояли из массивов размером 3×3 ячейки, а шаг их размещения составлял 4 ячейки модулятора света. Вначале было изучено влияние размера диафрагмы, ограничивающей площадь голограммы, на размеры изображений отдельных информационных элементов традиционного формата, вид их конфигураций и в конечном итоге на характеристики изображения страницы данных модифицированного формата в целом.

Рис. 6, *a* иллюстрирует часть изображения модифицированной страницы данных; рис. 6, *b* – его фрагмент размером 3×3 информационных элемента при диафрагме, равной $3/4$ размера центрального максимума фурье-спектра и соответствующей расчетному размеру голограммы для традиционной страницы данных; рис. 6, *c* – трехмерное изображение распределения интенсивности этого фрагмента. На рис. 7, *a–c* приведены аналогичные изображения при диафрагме в 3 раза меньшего размера и соответствующей расчетному размеру голограммы для модифицированной страницы данных. Из рисунка видно, что изображения отдельных информационных элементов, а также изображения массивов размером 3×3 таких элемента уширяются, накладываются друг на друга, вследствие этого разброс распределений их интенсивностей менее выражен. Количественный анализ показывает, что зна-

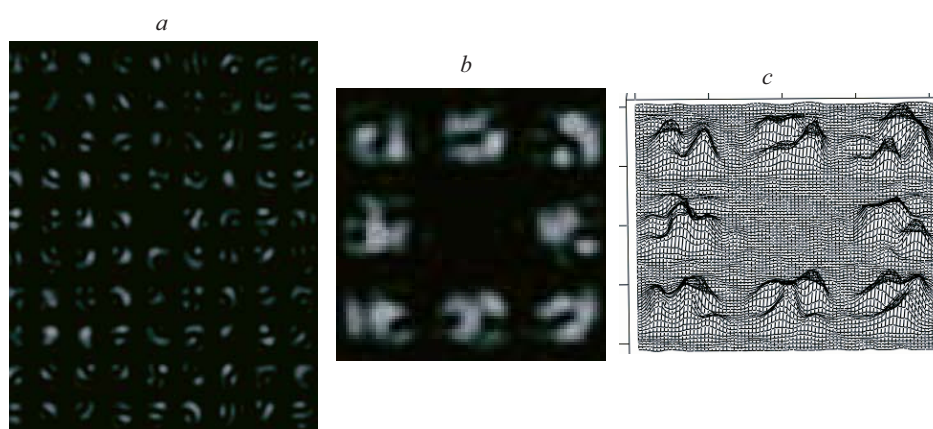


Рис. 7

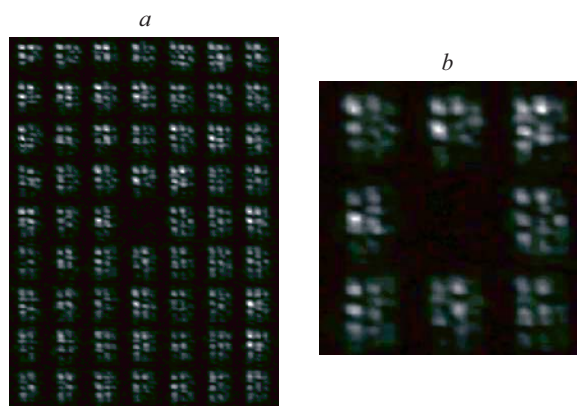


Рис. 8

чения характеристик полученных изображений для традиционного и модифицированного случаев составляют $K = 5:1$, $\sigma_1 = 0,16$ и $K = 7:1$, $\sigma_1 = 0,056$ соответственно, т. е. модифицированный вариант предпочтительнее.

Далее были записаны голограммы изображений страниц данных модифицированного формата при расчетном размере голограммы. Запись проводилась на фотополимерных материалах, изготовленных в Новосибирском институте органической химии СО РАН [8]. Часть восстановленного изображения и его фрагмент размером 3×3 информационных элемента показаны на рис. 8, *a, b*. Значения характеристик восстановленного изображения были следующими: $K = 3:1$, $\sigma_1 = 0,076$. Это заметно хуже вышепредставленных численных данных, что можно объяснить влиянием дополнительных факторов, не учитывавшихся при расчетах (главным образом нелинейности отклика и шумов рассеяния регистрирующей среды), однако показатель СКО превосходит характеристики типичных экспериментальных результатов восстановленных изображений страниц данных традиционного формата [9].

Заключение. Модификация оптической схемы голографической памяти, заключающаяся в представлении информационных элементов страницы данных не одной ячейкой пространственного модулятора света, как в традиционной схеме, а массивом размером 3×3 ячейки и пропорциональным уменьшением апертуры фурье-голограмм, позволяет снизить разброс сигналов информационных элементов, повысить отношение сигнал/фон, уменьшить критичность к юстировке восстановленных изображений относительно фотоматрицы. Это достигается благодаря пространственному усреднению неоднородностей распределений интенсивностей элементов восстановленных изображений, обусловленных дифракционными эффектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hill B. Some aspects of large capacity holographic memory // Appl. Opt. 1972. 11, N 1. P. 182–196.
2. Holographic Data Storage /Ed. by H. J. Coufal, D. Psaltis, G. Sincerbox. N. Y.: Springer-Verlag, 2000. Vol. 76.
3. Ashley J., Bernal M.-P., Burr G. W. et al. Holographic data storage // IBM Journ. Res. Develop. 2000. 44, N 3. P. 341–368.

4. **Блок А. А., Домбровский В. А., Домбровский С. А. и др.** Практический предел плотности записи данных в голографических ЗУ на плоских носителях // Автометрия. 1989. № 5. С. 26–39.
5. **Vyukhina N. N., Gibin I. S., Dombrovsky V. A. et al.** A review of aspects relating to the improvement of holographic memory technology // Opt. and Laser Technology. 1996. **28**, N 4. P. 269–276.
6. **Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф.** Статистические характеристики дифракционных помех в голографической памяти // Автометрия. 1994. № 3. С. 38–47.
7. **O'Callaghan M. J., McNeil J. R., Walker C., Handschy M. A.** Spatial light modulators with integrated phase masks for holographic data storage // Proc. SPIE. 2006. **6282**. P. 628208 4–628208 9.
8. **Шелковников В. В., Герасимова Т. Н., Лоскутов В. А. и др.** Голографические фотополимерные материалы // Наука – производству. 2004. № 5. С. 2–6.
9. **Блок А. А., Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф.** Экспериментальные исследования достоверности считывания данных в голографических ЗУ // Автометрия. 1984. № 3. С. 32–35.

Поступила в редакцию 29 сентября 2008 г.
