

Метод компьютерного синтеза микроголограмм Фурье и оптическая система их записи на голографический диск памяти

© С.Б. Одинокоев, Н.М. Вереникина,
А.С. Подгородняя, С.С. Донченко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Приведен метод записи синтезированных на компьютере голограмм Фурье. Показаны преимущества метода. Проведен анализ характеристик дополнительного фазового фильтра, необходимого для сглаживания спектра фурье-голограмм. Проанализировано влияние фильтра и геометрических параметров пространственно-временного модулятора света на характеристики пространственно-частотного спектра.

Ключевые слова: голограмма Фурье, компьютерный синтез, пространственно-временной модулятор света.

Введение. В настоящее время активно развиваются исследования по созданию оптико-голографической памяти (ОГП) на основе дисковых носителей повышенной емкости вплоть до 1 ТБ [1]. В разрабатываемых схемах ОГП наиболее перспективным направлением является упрощение техники реализации, уход от традиционных голографических схем. В этой связи разработка проекционного метода получения микроголограмм Фурье (МГФ) [2] для ОГП является актуальной. Синтезированная на компьютере голограмма вводится в оптическую схему с помощью пространственно-временного модулятора света (ПВМС) и записывается на голографический носитель. Компьютерный синтез МГФ для ОГП позволяет математически удалить нулевой порядок, провести фазовое кодирование опорных объектов и ограничить динамический диапазон, что приводит к значительному упрощению оптической системы записи голограммы [3]. При компьютерном синтезе МГФ важнейшим элементом является процесс кодирования страницы входных данных с помощью фазовой маски [3], а для определения параметров МГФ важна оценка влияния геометрических параметров ПВМС на параметры пространственно-частотного спектра (ПЧС).

В данной работе проанализировано распределение комплексных амплитуд светового поля в плоскости восстановленного с МГФ изображения в зависимости от параметров фазовой маски и ПВМС.

В случае проекционного метода записи синтезированных на компьютере МГФ основной причиной ограничения информационной емкости является ограничение разрешающей способности ПВМС. Если рассчитанная МГФ обладает большей размерностью, чем ПВМС, то ее часть, соответствующая высшим частотам ПЧС, отсекается.

Компьютерный синтез МГФ. При расчете МГФ в предметной плоскости задаются функция $h(x_1, y_1)$, описывающая страницу входных данных и смещенная относительно оптической оси на Δ вдоль оси Ox_1 , и амплитуда опорного пучка в виде δ -функции в центре по оптической оси. В результате коэффициент пропускания МГФ имеет следующий вид [2]:

$$\begin{aligned} \tau(x_f, y_f) &\sim I(x_f, y_f) = \left| C_{\text{ref}} + H_R \exp(-i2\pi\Delta x_f) \right|^2 = \\ &= C_{\text{ref}}^2 + \cancel{|H_R|^2} + C_{\text{ref}}^* H_R \exp(-i2\pi\Delta x_f) + C_{\text{ref}} H_R^* \exp(i2\pi\Delta x_f), \end{aligned} \quad (1)$$

где H_R — фурье-образ функции $h(x, y)$; C_{ref} — фурье-образ δ -функции опорного пучка; (x_f, y_f) — координата фурье-плоскости.

При восстановлении МГФ в плоскости восстановленного изображения (x_2, y_2) получим распределение, пропорциональное фурье-образу коэффициента пропускания МГФ:

$$\begin{aligned} T_{\text{out}}(x_2, y_2) &= \tilde{F}[\tau(x_f, y_f)] \sim \tilde{F}[C_{\text{ref}}^2] + \tilde{F}[H_R^* H_R] + \\ &+ C_{\text{ref}} \tilde{F}[H_R \exp(-i2\pi\Delta x_f) + H_R^* \exp(i2\pi\Delta x_f)] \sim \\ &\sim \delta(x_2, y_2) + \frac{\cancel{\tilde{F}[H_R^*(v_x, v_y) H_R(v_x, v_y)]}}{C_{\text{ref}}} + \\ &+ h_R(x_2 + \Delta, y_2) + h_R^*(-x_2 - \Delta, -y_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Член $|H_R|^2$ в выражении (1) приводит к появлению мешающей автокорреляционной компоненты в центре восстановленного поля согласно выражению (2). При расчете МГФ этим членом можно пренебречь. В результате получим формулу для расчета коэффициента пропускания МГФ:

$$\tau(x_f, y_f) = C + 2\text{Re}[H_R \exp(-i2\pi\Delta x_f)], \quad \tau(x_f, y_f) \geq 0, \quad (3)$$

где C — постоянная величина.

Кодирование страницы входных данных с помощью фазовой маски (ФМ). Если коэффициент пропускания транспаранта со стра-

ницей входных данных $\tau(x, y)$ задается дискретно в виде матрицы $\tau(k, l)$ отсчетов с шагом дискретизации $\Delta x, \Delta y$ [4], то

$$\tau(x, y) = \sum_{k=0}^{N_x} \sum_{l=0}^{N_y} \tau(k, l) \delta(x - \Delta x k, y - \Delta y l), \quad (4)$$

где N_x, N_y — числа отсчетов, определяемые размерами исходных объектов A и B :

$$N_x = \frac{A}{\Delta x}, \quad N_y = \frac{B}{\Delta y}. \quad (5)$$

Если шаг дискретизации $\Delta x, \Delta y$ удовлетворяет условию

$$\Delta x = \frac{1}{2\nu_{x \max}}; \quad \Delta y = \frac{1}{2\nu_{y \max}}, \quad (6)$$

где $2\nu_{x \max}, 2\nu_{y \max}$ — размеры ПЧС страницы входных данных, то матрица отсчетов $\tau(k, l)$ полностью определяет исходную непрерывную функцию $\tau(x, y)$. Тогда для дискретного объекта (4) распределение комплексных амплитуд в плоскости МГФ (в плоскости фурье-спектра) имеет следующий вид:

$$T_{\text{сп}}(\nu_x, \nu_y) = \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} \tau(k, l) \exp \left[i \cdot 2\pi \left(k \frac{\nu_x}{2\nu_{x \max}} + l \frac{\nu_y}{2\nu_{y \max}} \right) \right]. \quad (7)$$

На рис. 1 приведена зависимость модуля комплексной амплитуды МГФ (7) от пространственной частоты ν_x . Видно, что распределение модуля комплексной амплитуды имеет большой динамический диапазон, для «сглаживания» которого на страницу входных данных накладывают кодирующую фазовую маску (КФМ) (рис. 2).

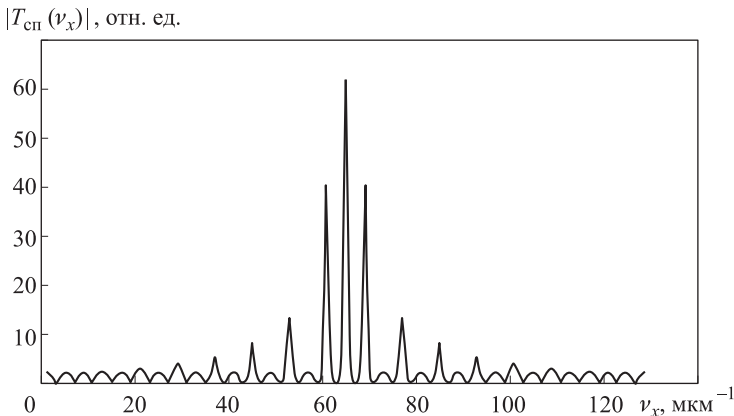


Рис. 1. Зависимость модуля комплексной амплитуды МГФ от пространственной частоты

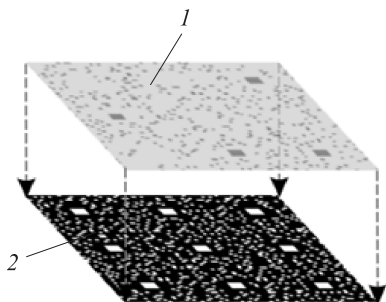


Рис. 2. Вид КФМ (1), накладываемой на страницу (2) входных данных (светло-серый тон соответствует нулевому набегу фазы КФМ, темно-серые области — набегу фазы, равному π)

Шаг КФМ включает число пикселей объекта на один элемент маски и в общем случае может быть разным, но кратным шагу квантования объекта, а значение шага КФМ влияет на точность восстановления мелких элементов.

Влияние шага и структуры КФМ на качество изображения страницы входных данных, восстановленного с МГФ, иллюстрирует рис. 3. Эксперименты также показали, что при уменьшении шага фазовой маски до значения меньше размера самого малого элемента записываемого объекта происходит резкое снижение точности восстановления голограммы.

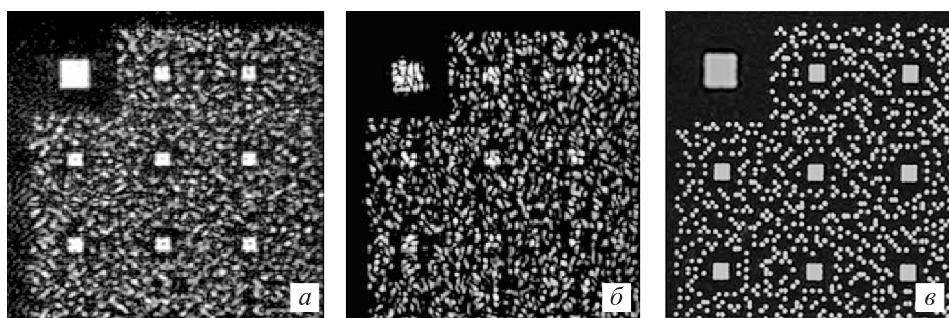


Рис. 3. Восстановленное изображение страницы входных данных без наложения КФМ (а), при наложении КФМ без использования алгоритма расчета фазового распределения (б) и с шагом, равным 1 пикселу (в)

Оценка влияния ограничения ПЧС МГФ при вводе в ПВМС. Выполняя БПФ от произведения коэффициентов пропуска страницы входных данных $\tau_{\text{вх}}$ и КФМ $\tau_{\text{фм}}$, получаем зависимость спектра $F\{\tau_{\text{вх}} \times \tau_{\text{фм}}\}$ от частот ν_x, ν_y , которая хранится в оперативной памяти компьютера. Необходимо учитывать, что частоты такого спектра должны четко соотноситься с распределением страницы исходных данных по координатам. Проведем еще одну принудительную дискретизацию спектра, так как ПВМС имеет свою структуру (габариты и шаг). Тогда объект может быть представлен матрицей отсчетов $\{F_\tau(r, s)\}$ на прямоугольном растре с шагом по координатам $\Delta\nu_x, \Delta\nu_y$:

$$T_{\text{сп}}(v_x, v_y) = \sum_{r=0}^{M_x-1} \sum_{s=0}^{M_y-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} \tau(k, l) \exp \left[i \cdot 2\pi \left(kr \frac{\Delta v_x}{2v_{x \max}} + ls \frac{\Delta v_y}{2v_{y \max}} \right) \right] \times \delta(v_x - r\Delta v_x, v_y - s\Delta v_y), \quad (8)$$

где M_x, M_y — размерности ПВМС по осям x и y .

Для $v_x, v_y, \Delta v_x, M_x, M_y$ должны выполняться соотношения

$$\Delta v_x = \frac{1}{A}; \quad \Delta v_y = \frac{1}{B}; \quad M_x = \frac{2v_{x \max}}{\Delta v_x}; \quad M_y = \frac{2v_{y \max}}{\Delta v_y}. \quad (9)$$

Если выполняются условия $N_x = M_x$ и $N_y = M_y$, то получим выражение для вычисления значений элементов матрицы после второй дискретизации по элементам матрицы исходного объекта:

$$T_{\text{сп}}(r, s) = \sum_{k=1}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} \tau(k, l) \exp \left[i \cdot 2\pi \left(\frac{kr}{N_x} + \frac{ls}{N_y} \right) \right]. \quad (10)$$

Выражение (10) является идеальным случаем. Такой же подход позволяет смоделировать неидеальный случай, когда $N_x \neq M_x$ и $N_y \neq M_y$.

Увеличение количества информации, записанной на голограмму, приводит к увеличению размера самой голограммы. Поскольку возможность используемого для вывода голограммы пространственного модулятора ограничена его размерностью, то при реализации МГФ большего размера ее часть, соответствующая высокочастотным элементам ПЧС, будет отсечена. Подобное искажение голограммы приводит к размыванию границ элементов записываемого объекта, что отражается на считывании восстановленного объекта. Подобное «урезание» в значительной степени может повлиять на точность восстановления мелких элементов записанного объекта, размерность которых 1...2 пиксела. На рис. 4, а, б представлены элемент объекта, записанного на голограмму размерностью 1536×2048, и фрагмент, численно восстановленный с этой же голограммы, после ее ограничения модулятором размером 768×1024 (в 2 раза).

Увеличение размерности рассчитанной МГФ до 2304×3072 при использовании того же модулятора (размерностью в 3 раза меньшей) привело к расползанию границ мелких элементов объекта, восстановленного с голограммы после ее урезания, вплоть до их слияния и потери читаемости объекта (рис. 4, в). Использование фазовой маски с увеличенным размером пикселя (1 пиксель маски на четыре элемента тестового объекта) также не дало положительных результатов (рис. 4, г).

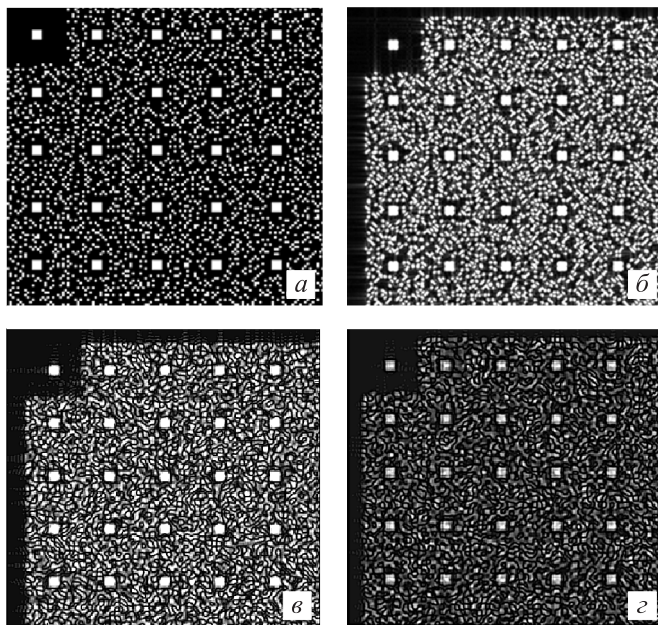


Рис. 4. Элемент страницы голографической памяти (а) и фрагмент, численно восстановленный с голограмм размерностями 1536×2048 и 2304×3072 (б) после их урезания до размерности модулятора (в) и после урезания голограммы размерностью 2304×3072 до размерности модулятора 1024×768 (увеличенный размер элемента ФМ) (г)

Расчеты МГФ с добавлением фазовых масок с разным шагом (число пикселей объекта на один элемент маски) показали, что выбор шага маски также влияет на точность восстановления мелких элементов при «урезании» голограммы до размерности модулятора. На рис. 5 представлены результаты расчетов для голограммы размерностью 16×1152 при ее урезании до размерности модулятора 1024×768 (в 1,5 раза). Видно, что при снижении шага фазовой маски до значения меньше размера самого малого элемента записываемого объекта происходит резкое снижение точности восстановления. В этом случае наблюдалось расщепление реперных точек вследствие неоднородности значения фазового множителя элементов в пределах одного репера. Следует также отметить, что при снижении шага ФМ наблюдалось снижение отношения интенсивностей нулевого и ± 1 дифракционных порядков.

Оптическая система получения МГФ. На рис. 6 представлена оптическая схема устройства записи компьютерно-синтезированных МГФ на регистрирующую среду методом проекции с помощью лазера 1 и осветительного объектива 2, формирующего однородную плоскую волну. При освещении плоской волной ПВМС 3, в качестве которого используется жидкокристаллический экран с электродной

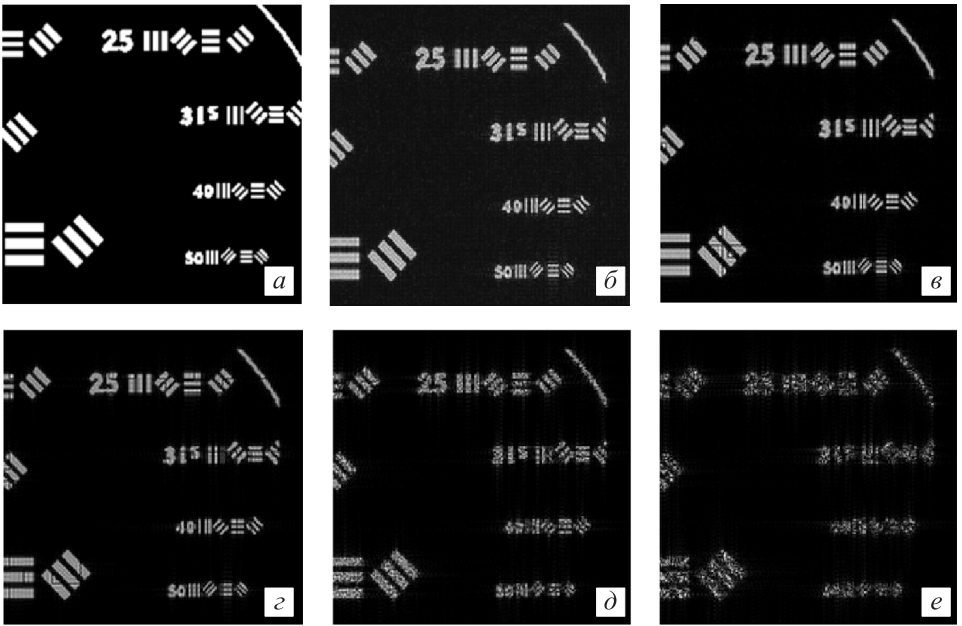


Рис. 5. Тестовый объект (а) и восстановленные объекты при различных значениях шага фазовой маски:
 б — без маски; в — 50 пикселей; г — 10 пикселей; д — 2 пикселя; е — 1 пиксел

структурой, в фокальной плоскости фурье-преобразующего объектива 4 получаем двумерный ПЧС МГФ, выведенной на ПВМС, с множеством неинформативных порядков дифракции. Поскольку пространственный спектр структуры ПВМС находится в более высокочастотной области ПЧС по сравнению с информативными низшими порядками дифракции, то имеется возможность отсечь спектр, формируемый структурой модулятора, с помощью пространственного фильтра, установленного в фокальной плоскости объектива 5, и тем самым исключить проекцию структуры электродов на регистрирующую среду 7.

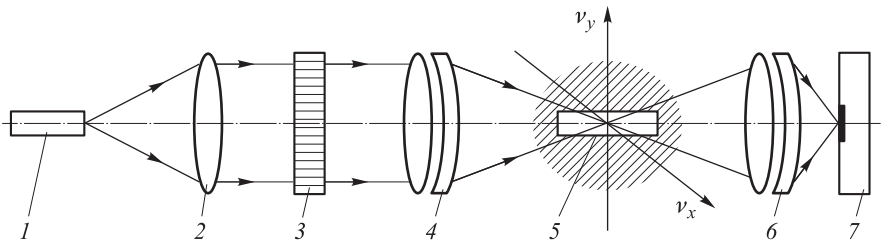


Рис. 6. Оптическая схема:

1 — лазер; 2 — осветительный объектив; 3 — ПВМС; 4, 6 — фурье-преобразующий и фурье-синтезирующий объективы; 5 — пространственный фильтр; 7 — регистрирующая среда

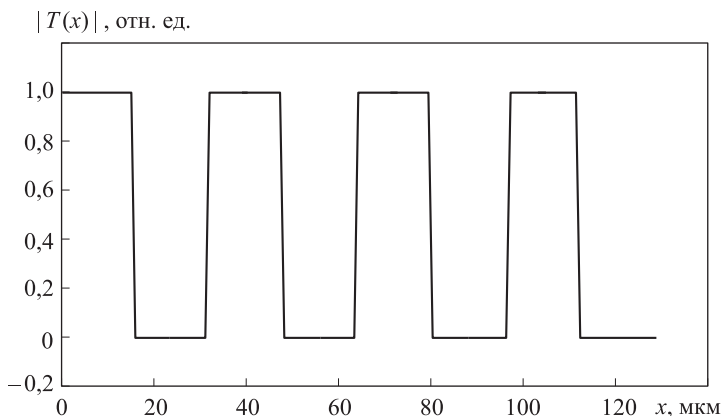


Рис. 7. Бинарная периодическая структура светового поля, формируемая ПВМС

Рассмотрим процесс фильтрации бинарной периодической структуры светового поля, формируемой ПВМС при освещении однородной плоской волной с амплитудой T_0 (рис. 7):

$$T(x, y) = T_0 \sum_i^N \sum_j^M \operatorname{rect}\left(\frac{x - x_i}{a}, \frac{y - y_j}{b}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{x - aM}{2aM}, \frac{y - bN}{2bN}\right), \quad (11)$$

где a, b — размеры ячейки ПВМС; M, N — число ячеек ПВМС по горизонтали и вертикали. Тогда в фокальной плоскости фурье-преобразующего объектива имеем распределение, представленное на рис. 1.

$$\begin{aligned} |T_c(v_x, v_y)| &= 2abNM \operatorname{sinc}(2\pi Nbv_x) \operatorname{sinc}(2\pi Mav_y) \times \\ &\times \frac{\cos[\pi(bv_x + av_y)]}{\cos(\pi bv_x) \cos(\pi av_y)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Найдем значение и положение максимумов нулевого и ± 1 порядков дифракции:

$$|T_c(v_x, v_y)|_{\max} = 2abNM, \quad v_x = 0, v_y = 0; \quad (13)$$

$$|T_c(v_x, v_y)|_{\max} = \frac{8abNM}{\pi^2}, \quad v_x = \pm \frac{1}{2a}, v_y = \pm \frac{1}{2b}. \quad (14)$$

С помощью фильтра размером $|v_{xц}| \geq \frac{1}{2a}, |v_{yц}| \geq \frac{1}{2b}$ вырезаем информативную часть ПЧС (рис. 8). Тогда можно записать

$$|T_\Phi(v_x, v_y)| = 2abNM \operatorname{sinc}(2\pi Nbv_x) \operatorname{sinc}(2\pi Mav_y) \times$$

$$\times \frac{\cos[\pi(bv_x + av_y)]}{\cos(\pi bv_x) \cos(\pi av_y)} \text{rect}\left(\frac{v - v_{xII}}{a}, \frac{v - v_{yII}}{b}\right). \quad (15)$$

В результате восстановленный входной сигнал после фурье-синтезирующего объектива в плоскости регистрирующей среды будет иметь вид, представленный на рис. 9.

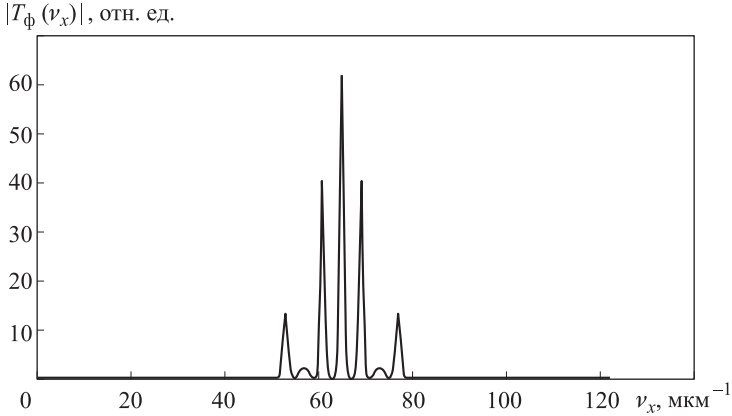


Рис. 8. Отфильтрованный ПЧС

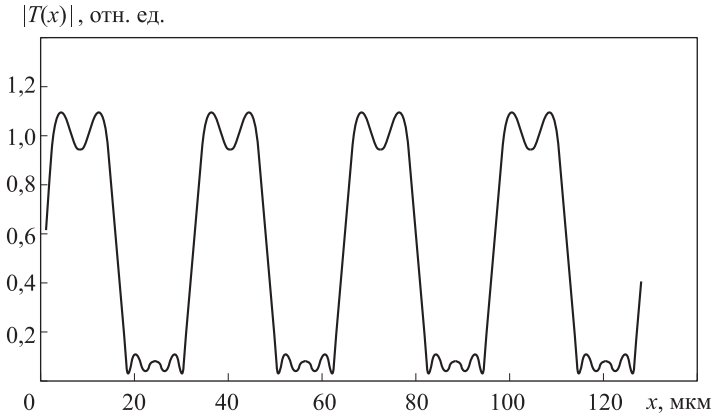


Рис. 9. Восстановленный сигнал

Одновременно с фильтрацией оптическая система выполняет функцию переноса информации, выведенной на ПВМС, с уменьшением в $30 \dots 60^{\times}$ в плоскость голографического диска (см. рис. 6, поз. 7). Таким образом, в плоскости голографического диска регистрируется МГФ без искажений структурой ПВМС.

На голографический диск диаметром 130 мм при использовании в качестве ПВМС жидкокристаллического экрана Sony LCX017DLT с разрешением 1024×768 пикселей и лазера с длиной волны излучения $\lambda = 630$ нм с помощью разработанной системы памяти можно за-

писать информацию порядка 300 Гбайт, что на порядок выше существующих оптических дисковых носителей информации.

Заключение. В работе исследован процесс записи компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье и показаны преимущества расчета волнового фронта с помощью компьютера. Проведен анализ характеристик дополнительной фазовой маски, необходимой для сглаживания спектра голограммы. Показано, что шаг фазовой маски должен быть больше шага микроголограммы, но обязательно кратен последнему. При исследовании влияния параметров ПВМС на ПЧС микроголограммы установлено, что если размерность ПВМС и микроголограммы отличаются не более чем в 1,2 раза, то возможно восстановление микроструктуры голограммы без искажения. Представлена проекционная оптическая система записи микроголограмм на регистрирующую среду с одновременной фильтрацией информационной части пространственно-частотного спектра.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.В37.21.1279 «Разработка метода и принципов построения оптико-голографической памяти, теоретические исследования получения компьютерно-синтезированных микроголограмм».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] www.inphase.com
- [2] Yaroslavsky L., Astora J. *Introduction to Digital Holography*. Bentham, 2013, 197 p.
- [3] Betin A.Yu., Bobrynov V.I., Evtikhiev N.N., Zherdev A.Yu., Zlokazov E.Yu., Lushnikov D.S., Markin V.V., Odnokoev S.N., Starikov S.N., Starikov R.S. Method of computer generation and projection recording of microholograms for holographic memory systems: mathematical modeling and experimental implementation. *Quantum electronics*, 2013, vol. 43, no. 1, pp. 87–89.
- [4] Бахрах Л.Д., ред. Современное состояние и перспективы развития голографии. Ленинград, Наука, 1974, 195 с.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Одинокоев С.Б., Вереникина Н.М., Подгородняя А.С., Донченко С.С. Метод компьютерного синтеза микроголограмм Фурье и оптическая система их записи на голографический диск памяти. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/916.html>

Одинокоев Сергей Борисович родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. по специальности «Оптико-электронные приборы». Д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 200 опубликованных работ. Специализируется в области оптико-голографических систем. e-mail: odionokov@bmstu.ru

Вереникина Нина Михайловна родилась в 1947 г., окончила МВТУ им. Н. Э. Баумана в 1971 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана, член Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Автор более 130 научных работ и более 15 изобретений в области лазерной техники. e-mail: verenikina@bmtu.ru

Подгородняя Анастасия Сергеевна родилась в 1990 г., студентка 5 курса кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана. e-mail: podgorodniya@gmail.com

Донченко Сергей Сергеевич родился в 1990 г., студент 6 курса кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана.