

УДК 004.072.3

Исследование влияния геометрических параметров модулятора света на информационную емкость синтезированных цифровых голограмм

Фурье

Подгородняя А.С., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

Научные руководители: Одинокоев С. Б., д.т.н., доцент

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

Вереникина Н. М., к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
baryshnikov@bmstu.ru*

Увеличение информативной ёмкости является ключевой задачей при разработке голографического метода записи и хранения данных. В случае проекционного метода записи синтезированных на компьютере голограмм основной причиной ограничений информационной ёмкости являются ограничения разрешающей способности ПВМС, с помощью которого голограмма вводится в оптическую схему. В нашем случае используется ПВМС Sony LCX017DLT с разрешением 1024x768 пикселей, поэтому если рассчитанная голограмма обладает большим разрешением, то её часть, соответствующая высшим частотам пространственного Фурье-спектра объекта, будет отсечена. Подобное “урезание” в значительной степени может сказаться на точности восстановления мелких элементов записанного объекта, размерность которых 1-2 пикселя. Чтобы сделать правильный выбор ПВМС, необходимо проанализировать формируемое им распределение поля на регистрирующей среде.

Компьютерный синтез. Рассмотрим алгоритм расчета компьютерно-синтезированной голограммы Фурье.

В данной работе объектом для записи является бинарное изображение страницы данных размерностью $N_x \times N_y$ битов.

Данную страницу можно представить в виде совокупности пропускающих окон с различным коэффициентом пропускания $\tau(x, y)$ по амплитуде, которые заданы в двумерной системе координат с шагом $\Delta x, \Delta y$ (представлена на рис.1).

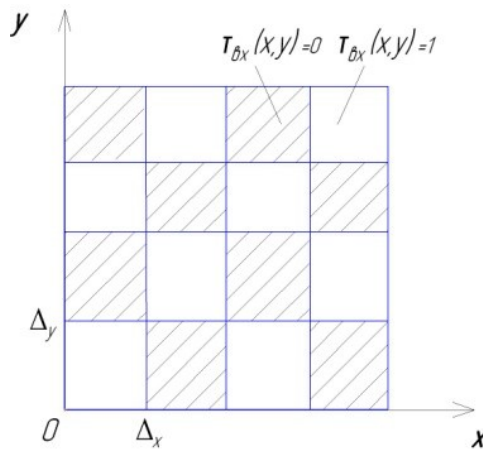


Рис. 1. Пропускание входного объекта

В общем случае коэффициент пропускания $\tau(x, y)$ является комплексной функцией

$$\tau(x, y) = |\tau(x, y)| \cdot \exp(i \cdot \beta(x, y)) \quad (1)$$

Наша математическая голограмма отличается от стандартной отсутствием составляющей, связанной с опорным пучком. При расчете голограммы в предметной плоскости используется распределение, состоящее из δ - функции в центре и записываемого объекта $h(x, y)$, смещенного относительно центра на величину Δ вдоль оси Ox . Тогда коэффициент пропускания регистрирующей среды определяется преобразованием Фурье этого распределения и имеет следующий вид:

$$\tau(x_f, y_f) \sim I(x_f, y_f) = |C_{ref} + H_R \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot x_f)|^2 = C_{ref}^2 + |H_R|^2 + C_{ref}^* \cdot H_R \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot x_f) + C_{ref} \cdot H_R^* \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot x_f), \quad (2)$$

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

При восстановлении записанной компьютерно-синтезированной голограммы в выходной плоскости (x_2, y_2) получим распределение, пропорциональное фурье-образу коэффициента пропускания регистрирующей среды,

$$T_{out}(x_2, y_2) = \tilde{F}[\tau(x_f, y_f)] \sim \tilde{F}[C_{ref}^2] + \tilde{F}[H_R^* \cdot H_R] + C_{ref} \cdot \tilde{F}[H_R \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot x_f) + H_R^* \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot x_f)] \sim \delta(x_2, y_2) + \frac{1}{C_{ref}} \cdot \tilde{F}[H_R^*(v_x, v_y) \cdot H_R(v_x, v_y)] + h_R(x_2 + \Delta, y_2) + h_R^*(-x_2 - \Delta, -y_2) \quad (3)$$

Член $|H_R|^2$ в выражении (2) приводит к появлению мешающей автокорреляционной компоненты в центре восстановленного поля согласно выражению (3). При расчёте

голограммы этим членом можно пренебречь. В результате получим формулу для коэффициента пропускания

$$\tau(x_f, y_f) = C + 2 \cdot \operatorname{Re}[H_R \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot x_f)], \quad \tau(x_f, y_f) \geq 0, \quad (4)$$

где C – матрица постоянных величин.

Распределение (3) в координатах пространственной частоты ν_x представлено на рисунке 2

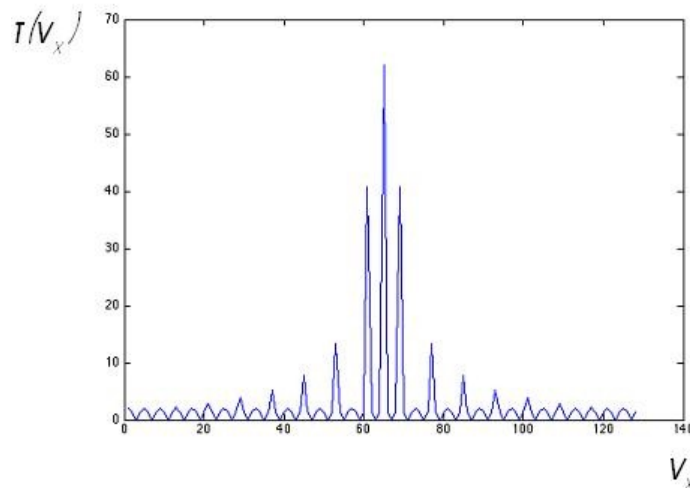


Рис. 2. Спектр пропускания входного объекта

Как видно из рис. 2, распределение имеет большой динамический диапазон, для уравнивания которого на такую страницу данных накладывают фазовую маску (рисунок 3), получая на выходе сглаженный и легко регистрируемый спектр. Шаг фазовой маски (количество пикселей объекта на один элемент маски) в общем случае может быть разным, но кратным шагу квантования объекта.

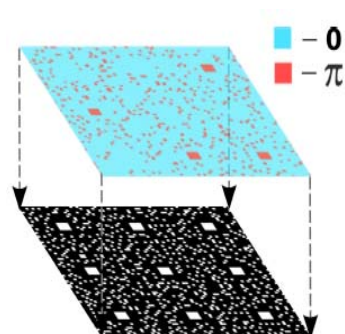


Рис. 3. Специализированная фазовая маска, накладываемая на страницу входных данных.

Взяв БПФ $F\{\tau_{\text{вх}} \times \tau_{\text{фм}}\}$ Мы получаем строгую зависимость спектра от набора частот ν_x, ν_y , который хранится в оперативной памяти компьютера и может быть дискретизирован

и оптимизирован. Необходимо учитывать, что частоты такого спектра должны четко соотноситься с распределением страницы данных по координатам.

Для применения компьютерного синтеза входной объект задается дискретно, в виде матрицы $\tau(k, l)$ отсчетов $\tau(x, y)$ с шагом дискретизации $\Delta x, \Delta y$

$$\hat{\tau}(x, y) = \sum_{k=0}^{N_x} \sum_{l=0}^{N_y} \tau(k, l) \cdot \delta(x - \Delta x, y - \Delta y) \quad , \quad (5)$$

где N_x, N_y – число отсчетов, определяемое размерами транспаранта $2X_{\max}, 2Y_{\max}$

$$N_x = \frac{2 \cdot X_{\max}}{\Delta x}, N_y = \frac{2 \cdot Y_{\max}}{\Delta y} \quad . \quad (6)$$

Если шаг дискретизации $\Delta x, \Delta y$ удовлетворяют условиям

$$\Delta x = \frac{1}{2 \cdot v_{x \max}}, \Delta y = \frac{1}{2 \cdot v_{y \max}} \quad , \quad (7)$$

где $2v_{x \max}, 2v_{y \max}$ – размеры пространственного спектра $\tau(x, y)$, то матрица отсчетов $\tau(k, l)$ полностью определяет исходную непрерывную функцию $\tau(x, y)$. Фурье-голограмма дискретного объекта (5), имеет вид

$$F_{\hat{\tau}}(v_x, v_y) = \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} \tau(k, l) \cdot \exp \left[i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(k \cdot \frac{v_x}{2 \cdot v_{x \max}} + l \cdot \frac{v_y}{2 \cdot v_{y \max}} \right) \right] \quad . \quad (8)$$

Размеры объекта (5) также ограничены, и он может быть представлен матрицей отсчетов $\{F_{\hat{\tau}}(r, s)\}$ на прямоугольном растре с шагом по координатам $\Delta v_x, \Delta v_y$

$$F_{\hat{\tau}}(v_x, v_y) = \sum_{r=0}^{M_x-1} \sum_{s=0}^{M_y-1} \sum_{k=0}^{M_x-1} \sum_{l=0}^{M_y-1} \tau(k, l) \cdot \exp \left[i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(k \cdot r \cdot \frac{\Delta v_x}{2 \cdot v_{x \max}} + l \cdot s \cdot \frac{\Delta v_y}{2 \cdot v_{y \max}} \right) \right] \cdot \delta(v_x - r \cdot \Delta v_x, v_y - s \cdot \Delta v_y) \quad . \quad (9)$$

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

$$\Delta v_x = \frac{1}{2 \cdot X_{\max}}, \Delta v_y = \frac{1}{2 \cdot Y_{\max}}, M_x = \frac{2 \cdot v_{x \max}}{\Delta v_x}, M_y = \frac{2 \cdot v_{y \max}}{\Delta v_y} \quad . \quad (10)$$

Это соответствует дискретизации голограммы с шагом

$$\Delta \xi = \frac{\lambda}{2 \cdot \theta_x}, \Delta \eta = \frac{\lambda}{2 \cdot \theta_y} \quad , \quad (11)$$

где $2\theta_x, 2\theta_y$ – угловые размеры объекта при его наблюдении с плоскости голограммы.

В силу соотношений (6), (7), (10), (11): $N_x=M_x, N_y=M_y$

получим выражение для вычисления значений элементов матрицы после второй дискретизации по элементам матрицы исходного объекта

$$F_{\hat{\tau}}(r, s) = \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} \tau(k, l) \cdot \exp \left[i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{k \cdot r}{N_x} + \frac{l \cdot s}{N_y} \right) \right] \quad . \quad (12)$$

Однако, величина шага фазовой маски влияет на точность восстановления мелких элементов при урезании голограммы до размерности модулятора. При уменьшении шага

фазовой маски до величины меньше размера самого малого элемента записываемого объекта происходит резкое снижение точности восстановления голограммы.

Влияние фазовой маски на качество изображения страницы входных данных, восстановленного с микроголограммы проиллюстрировано рисунками 4(а, б, в); 5(а, б, в):

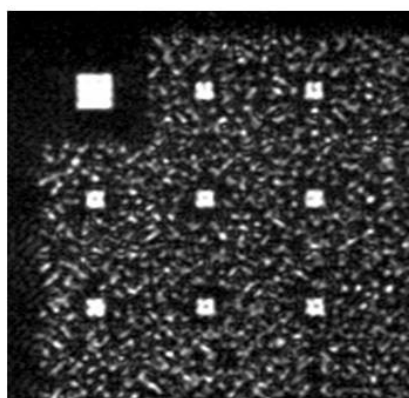


Рис. 4а.

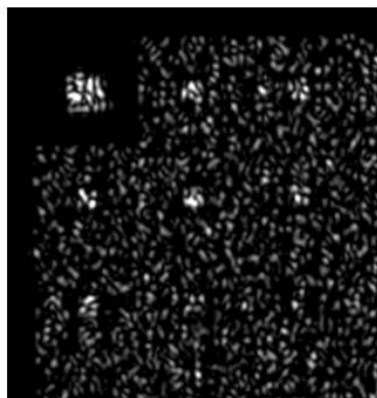


Рис. 4б.

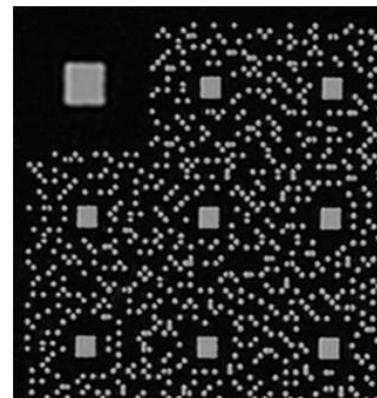


Рис. 4в.

Рис. 4. Голографическое изображение страницы входных данных без наложения фазовой маски; рис. 4б - голографическое изображение страницы входных данных при наложении фазовой маски без использования алгоритма расчета фазового распределения; рис. 4в - голографическое изображение страницы входных данных при наложении фазовой маски рассчитанной по алгоритму, приведенному выше

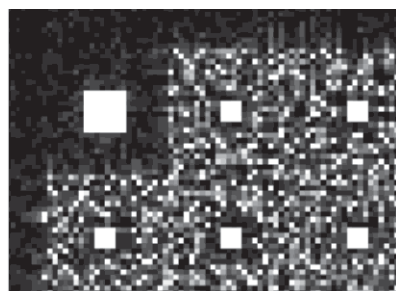


Рис. 5а.

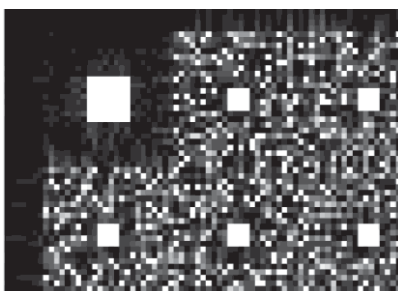


Рис. 5б.

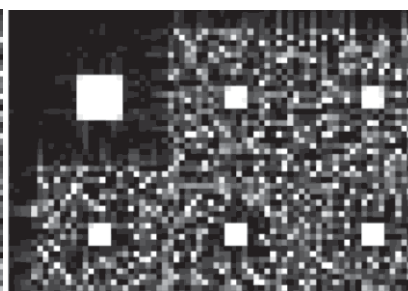


Рис. 5в.

Рис. 5. Элементы объектов, численно восстановленных с голограмм размерности 1200x900 урезанных до размерности 1024x768 для различных значений шага случайной фазовой маски: а) без маски; б) шаг 1 пиксель; в) шаг 24 пикселя

Далее, синтезированный и обработанный спектр из ОЗУ выводится на ЖК-ПМС и с уменьшением и частичной фильтрацией шумов методом проекции записывается на носитель. Качество записанной голограммы будет зависеть от уменьшения проекционной системы и разрешения ПВМС. Для нашего ПВМС размер пикселя ≈ 30 мкм, диагональ 4,6 см.

Проводится принудительная дискретизация спектра, так как ПВМС имеет свою структуру (габариты и шаг).

На рисунке 6 показана оптическая схема устройства записи компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье на 3D-фоточувствительную среду методом проекции с помощью лазера.

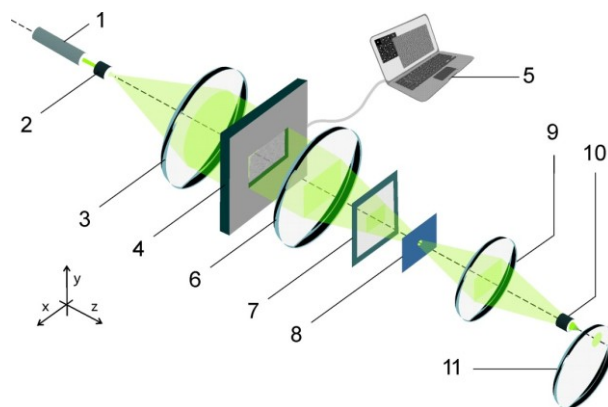


Рис. 6. Оптическая схема: 1– лазер; 2– микрообъектов; 3– объектив; 4– ПВМС; 5– ПК; 6– фурье-объектив; 7– анализатор; 8– диафрагма; 9– объектив; 10– микрообъектов; 11– голографическая пластина

Информационная емкость. Информационная емкость - это максимальное количество информации, которое может быть записано на голографическую пластину.

Оценим информационную емкость полученной голограммы через плотность записи информации на примере синтезированного голодиска

$$n = \frac{N_x \cdot N_y}{h_x \cdot h_y} = \frac{850 \cdot 400 \text{ бит}}{(0.5 \text{ мм})^2} \approx 16.2 \frac{\text{Мбайт}}{\text{см}^2}, \quad (13)$$

где $N_x \cdot N_y$ - количество бит содержащейся информации; $h_x \cdot h_y$ - площадь голограммы

Основные параметры оптической системы из 20 каналов оптической головки для записи голографического диска представлены в таблице.

Длина волны лазерного излучения	$\lambda=405 \text{ нм}$
Диаметр компьютерно-синтезированной микроголограммы Фурье	0,3 мм
Общее количество информации на одной микроголограмме Фурье	0,8 Мбит
Количество каналов в оптической головке записи	20 каналов

Общее количество мультиплексированных микроголограмм Фурье	3 741 960 шт
Общее количество информации на голографическом диске 130 мм	300 Гбайт
Плотность записи информации	до 1,0 Тбайт/см ³

Заключение. В работе исследован процесс записи компьютерно-синтезированных фурье-голограмм и показаны преимущества расчета волнового фронта в компьютере. Проведен анализ характеристик дополнительного фазового фильтра, необходимого для сглаживания спектра фурье-голограммы. Приведен анализ информационной емкости голограммы в зависимости от разрешения ПВМС.

Список литературы

1. Современное состояние и перспективы развития голографии / Л.Д. Бахраха [и др.] Л.: Наука, 1974. 195 с.
2. Методы цифровой голографии / Л.П. Ярославский [и др.] М.: Наука, 1977. 192 с.
3. Введение в компьютерную оптику: Учеб. пособие.- М.: Изд-во МГУ, 1991. 312 с.
4. Introduction to Digital Holography / L. Yaroslavsky, 2009. 189 p.