грамм, каждая из которых несет информацию об одной строке всей страницы. Восстановление такой последовательности может производиться параллельным пучком достаточного сечения.

Просветляя следующий столбец модулятора и переключая с помощью дефлектора сигнальный пучок на соседний элемент линейки микролинз, мы можем записать новую голограммную дорожку.

В описываемой схеме была осуществлена запись 6 голограммных дорожек по 256 бит длиной 2 мм с шагом дорожек 0,38 мм, что позволило производить параллельное считывание всего массива, записанного на каждой голограммной дорожке. Эффективность полученных голограмм при использовании фотопластинок ПЭ-1 составила около 12% при отношении сигнал/шум 8/1. При записи использовался лазер ЛГ-36 и дефлектор электромеханического типа.

Таким образом, принцип последовательной построчной записи информации на одномерные голограммы может служить одним из решений проблемы ввода информации в оптический канал ГЗУ. Описанный принцип может, в частности, найти применение при построении голографических систем памяти с движущимся носителем с поблочной выборкой информации.

## ЛИТЕРАТУРА


1. **Anderson L. K.** Holographic optical memory for bulk data storage.— "Bell Lab. Recognition", 1968, N 46, p. 318.
2. **Information** storage system is based on 1-dimensional hologram.— "Computer Design", 1973, vol. 12, N 12, p. 44.
3. **Ih. C. S.** Sequential information retrieval from holograms.— "Appl. Opt.", 1976, vol. 15, N 11, p. 2698—2700.
4. **Rüll H.** Holographic storage of information in narrow tracks.— "Laser 75 Opto-Electron. Conf. Proc., Munich, 1975". Guildford, 1976, p. 241—247.



*Поступила в редакцию 27 июля 1977 г.;*
*окончательный вариант — 10 ноября 1977 г.*


---


УДК 535.4 : 519.28



**О. Е. ТРОФИМОВ**

*(Новосибирск)*


# ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ СИНТЕЗА КИНОФОРМОВ

Задачу синтеза киноформов можно сформулировать следующим образом. Задана неотрицательная функция $f(x, y)$, нужно найти чисто фазовую функцию

$$g(\lambda_1, \lambda_2) = \begin{cases} e^{i\varphi(\lambda_1, \lambda_2)}, & -a \leqslant \lambda_1 \leqslant a, \quad -a \leqslant \lambda_2 \leqslant a; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

(В дальнейшем функцию $g(\lambda_1, \lambda_2)$ будем обозначать просто $e^{i\varphi(\lambda_1, \lambda_2)}$, опуская второе условие.) Модуль преобразования Френеля от функции $g(\lambda_1, \lambda_2)$ должен как можно лучше приближать функцию $f(x, y)$. Один из методов синтеза киноформов заключается в следующем. Рассматривается случайная функция $F(x, y) = f(x, y)e^{i\psi(x, y)}$, где $f(x, y)$ —заданная функция, а фаза $\psi(x, y)$ —случайная, причем распределение фазы таково, что значения ее в различных точках независимы. В качестве искомой $\varphi$ берут фазу обратного преобразования Френеля от функции $F(x, y)$. Таким образом, приближающей будет функция

$$S(x, y) = F_r(\bar{F}_r(F(x, y))/|F_r(F(x, y))|),$$

где $F_r(F(x, y))$ и $\bar{F}_r(F(x, y))$ означают прямое и обратное преобразования Френеля от функции $F(x, y)$. В работе [2], посвященной обоснованию изложенного метода, показано, что $M(|S(x, y)|^2)$ — математическое ожидание квадрата модуля функции $S(x, y)$ — может быть разложено в ряд

$$M(|S(x, y)|^2) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i f_i(x, y).$$

Причем $f_1(x, y) = f^2(x, y)$, а коэффициент при первом члене составляет примерно 78% от общей суммы коэффициентов.

Перейдем теперь к описанию способа генерирования случайной фазы $\varphi(\lambda_1, \lambda_2)$, при котором

$$M(|F_r(e^{i\varphi(\lambda_1, \lambda_2)})|^2) = f^2(x, y) + c,$$

т. е. математическое ожидание квадрата модуля приближающей функции совпадает с приближаемой функцией с точностью до константы $c \geqslant 0$ (величина константы $c$ и условия равенства ее нулю будут обсуждаться ниже).

Сделаем еще одно замечание:

$$F_r(g(\lambda_1, \lambda_2)) = \frac{e^{i\frac{\pi d}{\lambda}}}{i\lambda d} \int\int g(\lambda_1, \lambda_2)\, e^{i\frac{\pi}{\lambda d}[(\lambda_1 - x)^2 + (\lambda_2 - y)^2]} d\lambda_1 d\lambda_2.$$

Раскрывая скобки в показателе экспоненты и выбирая соответствующим образом единицы измерения, получаем

$$|F_r(g(\lambda_1, \lambda_2))| = \left| \int\int g(\lambda_1, \lambda_2)\, e^{\frac{i\left(\lambda_1^2 + \lambda_2^2\right)}{4}} e^{-i(\lambda_1 x + \lambda_2 y)} d\lambda_1 d\lambda_2 \right| =$$
$$= \left| F_y\left( g(\lambda_1, \lambda_2) e^{\frac{i\left(\lambda_1^2 + \lambda_2^2\right)}{4}} \right) \right|.$$

Таким образом, модуль преобразования Френеля от функции $g(\lambda_1, \lambda_2)$ совпадает с модулем преобразования Фурье функции $g(\lambda_1, \lambda_2)\, e^{\frac{i\left(\lambda_1^2 + \lambda_2^2\right)}{4}}$ (см. [2, с. 8]). Итак, если фаза $\varphi(\lambda_1, \lambda_2)$ такова, что $M(|F_y(e^{i\varphi(\lambda_1, \lambda_2)})|^2) = f^2(x, y) + c$, то для $\psi(\lambda_1, \lambda_2) = \varphi(\lambda_1, \lambda_2)\, e^{-\frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{4}}$ получаем

$$M(|F_r(e^{i\psi(\lambda_1, \lambda_2)})|^2) = f^2(x, y) + c.$$

Сделанное замечание позволяет перейти к модулям преобразований Фурье чисто фазовых функций.

Будет рассмотрен дискретный вариант задачи. Для того чтобы не пугать читателя четырехкратным суммированием, изложение проведем в одномерном случае. Прием, который используется в одномерном случае к каждой точке вектора, в двумерном случае должен быть применен к каждому элементу соответствующей матрицы. Итак, пусть функция $f(x)$ $(0 \leqslant x \leqslant 1)$ задана на сетке $x_l = l/N$, $0 \leqslant l \leqslant N$, $f_l = f(l/N)$.

Рассмотрим прямое дискретное преобразование Фурье от $\{f_l\}$. Полагаем

$$A_j = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} f_l \exp\{-2\pi i j x_l\}.$$

Тогда

$$f_l = \sum_{q=0}^{N-1} A_q \exp(2\pi i q x_l);$$

введем обозначения $E_{ql} = \exp(2\pi i q x_l)$ и рассмотрим выражение

$$S_l = \sum_{q=0}^{N-1} e^{i\varphi_q} E_{ql},$$

где $\varphi_q$ — случайные величины, $0 \leqslant q \leqslant N$. Тогда

$$M(|S_l|^2) = M(S_l S_l^*) = M \sum_{q=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{N-1} e^{i\varphi_q} e^{-i\varphi_r} E_{ql} E_{rl}^* =$$

$$= \sum_{q=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{N-1} E_{ql} E_{rl}^* M e^{i\varphi_q} e^{-i\varphi_r}. \qquad (1)$$

Если $\varphi_q$ и $\varphi_r$ независимы при $q \neq r$, то из (1) получаем

$$M(|S_l|^2) = N + \sum_{\substack{q,r \\ q \neq r}} E_{ql} E_{rl}^* M e^{i\varphi_q} M e^{-i\varphi_r}. \qquad (2)$$

Сравним равенство (2) с выражением для $|f_l|^2$:

$$|f_l|^2 = \sum_{q=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{N-1} A_q A_r^* E_{ql} E_{rl}^* = \sum_{i=0}^{N-1} |A_i|^2 + \sum_{\substack{q,r \\ q \neq r}} E_{ql} E_{rl}^* A_q A_r^*. \qquad (3)$$

Если теперь выбрать распределение величин $\varphi_r$ так, что для всех $r\,(0 \leqslant r \leqslant N)$ $M e^{i\varphi_r} = A_r$, $M e^{-i\varphi_r} = A_r^*$, то получим $M(|S_l|^2) = f_l^2 + c$ для всех $l$, где $c = N - \sum_{i=0}^{N-1} |A_i|^2$, но величины $S_l$ являются дискретным преобразованием Фурье от чисто фазового набора $\{e^{i\varphi_q}\}$.

Итак, по заданному числу $A_q$ нужно найти распределение случайной фазы $\varphi_q$, такое, чтобы выполнялось равенство $M e^{i\varphi_q} = A_q$. Пусть $A_q = |A_q| e^{i\alpha_q}$. Если $M e^{i\varphi_q} = |A_q|$, то для $\psi_q = \varphi_q + \alpha_q$ получаем $M e^{i\psi_q} = M e^{i\varphi_q} e^{i\alpha_q} = A_q$. Таким образом, достаточно найти распределения для величин $\varphi_q$, таких, что $M e^{i\varphi_q} = |A_q|$. Здесь нам нужно положить, что $|A_q| \leqslant 1$ (этого всегда можно добиться соответствующей нормировкой). Величина $M e^{i\varphi_q}$ есть значение в единице характеристической функции случайной величины $\varphi_q$ или, что то же самое, преобразование Фурье от плотности распределения величины $\varphi_q$. Выбирая параметрическое семейство распределений случайных величин $\varphi_q$, можно добиться соответствующих равенств. Например, для случайной величины, равномерно распределенной на отрезке $[-a, a]$, характеристическая функция равна $\sin ax/ax$, значение в единице $\sin a/a$. Если теперь $a_q$ выбирать из условия $\sin a_q/a_q = |A_q|$ (при $|A| \leqslant 1$ такой выбор всегда возможен) и взять $\varphi_q$ равномерно распределенной на отрезке $[-a_q, a_q]$, то получим равенство $M e^{i\varphi_q} = |A_q|$.

Таким образом, если задан вектор $\{f_l\}$, нужно взять от него дискретное преобразование Фурье — вектор $\{|A_q| e^{i\alpha_q}\}$. Затем из условия $\sin a_q/a_q = |A_q|$ найти вектор $\{a_q\}$.

Если теперь мы будем образовывать векторы $\{e^{i\varphi_q}\}$, где $\varphi_q = \psi_q + \alpha_q$, $\psi_q$, равномерно распределенные в интервале $(-a_q, a_q)$, то математическое ожидание квадратов модулей от дискретных преобразований

Фурье таких векторов будет совпадать с квадратом заданной функции с точностью до константы $c = N - \sum_{i=1}^{N} |A_i|^2$ (поскольку мы предполагаем, что $|A| \leqslant 1$, то $c \geqslant 0$). Отметим еще раз, что распределения не обязательно брать равномерные. Существует много других семейств, на которых можно обеспечить заданные требования, например, гауссовские. По-видимому, представляет интерес задача выбора распределений, обеспечивающих минимизацию различных характеристик уклонения приближающих функций от приближаемой.

Сделаем еще несколько замечаний, которые нам представляются существенными.

1. В методах, рассмотренных в работе [2], и в настоящей заметке гарантируется «близость» $M(|S(x)|^2)$ к $f^2(x)$, что, вообще говоря, не означает «близости» $M(|S(x)|)$ к $f(x)$ и $[M(|S(x)|)]^2$ к $f^2(x)$. Дело в том, что $M(|S(x)|^2) - [M(|S(x)|)]^2 = \sigma^2(|S(x)|) > 0$. Если дисперсия по всему полю (в частности, везде близка к нулю), то кривая $[M(|S(x)|)]^2$ имеет ту же форму, что и кривая $M(|S(x)|^2)$; если же дисперсия существенно не стационарна, то указанные кривые могут сильно отличаться.

2. В экспериментах подобного рода обычно используется лишь одна реализация приближающей случайной функции. В связи с этим особый интерес представляют характеристики вида

$$M((\sum (f_i - |S_i|))^2) \quad \text{или} \quad M((\sum (f_i^2 - |S_i|^2))^2).$$

Изучение таких характеристик является более сложной задачей в связи с возможной статистической зависимостью погрешностей в разных точках поля. Величины, рассматриваемые в работе [2] и в настоящей заметке, могут быть использованы для оценки указанных характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гудмен Дж.** Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.
2. **Kermisch D.** Image reconstruction from phase information only.— "J. Opt. Soc. Amer.", 1970, vol. 60, N 1, p. 15.

*Поступила в редакцию 12 апреля 1977 г.*

---

УДК 535.4

**В. А. ВЕРЕВКИН, В. В. ДОНЦОВА, Г. А. ЛЕНКОВА**

*(Новосибирск)*

# ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ КИНОФОРМОВ

Киноформные оптические элементы подобно голограммам предназначены для преобразования волнового фронта. Однако в отличие от голограмм они создают изображение только в одном дифракционном порядке и в идеальном случае весь падающий свет используется для восстановления этого единственного изображения [1]. Обычно киноформы синтезируются на ЭВМ, но для простейших элементов, таких, как линзы и решетки, которые формируют сферическую волну или просто отклоняют падающий пучок света, применяются также оптические способы [2]. Существенный недостаток известных методов в том, что они непременно сопровождаются процессами квантования или ска-