

УДК 535.317.1

ПРИНЦИП ИМПУЛЬСНО-КОДОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ СИНТЕЗА БИНАРНЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

А. В. Кузьменко

На основе принципа импульсно-кодовой модуляции (ИКМ), известного из теории связи, предложен метод кодирования выборок волнового поля в ячейках бинарных цифровых голограмм типа Ли и Ломана, обеспечивающий логарифмическую зависимость размеров ячейки от числа уровней квантования выборок (в обычных методах эта зависимость линейная). Используя обычные среды и устройства регистрации цифровых голограмм, с помощью данного метода можно получать такие бинарные цифровые голограммы, в которых шум квантования практически отсутствует. Дается дифракционная теория ИКМ-Ли-голограммы, описывается метод ее расчета на ЦВМ, приводится эксперимент по получению голограмм и восстановлению волновых фронтов.

Введение

В бинарных цифровых голограммах, синтезируемых методами Ли и Ломана [1-3], размеры элементарной ячейки голограммы (выраженные в числах элементов разрешения) определяются числом уровней квантования соответственно действительной и мнимой составляющих или амплитуды и фазы регистрируемых комплексных выборок, причем зависят от этого числа линейно. По этой причине с ростом числа уровней квантования выборок (при фиксированном числе выборок) растет общее число элементов разрешения, требуемых для построения голограммы, что затрудняет получение голограмм, содержащих относительно большее число достаточно часто проквантованных отсчетов в связи с ограниченными возможностями существующих устройств регистрации цифровых голограмм. Кроме того, увеличение числа уровней квантования усложняет процесс получения голограмм рабочих размеров [4]. Следовательно, как принципиальный, так и практический интерес представляет поиск других, отличных от известных, методов кодовой записи выборок в ячейках бинарных голограмм, обеспечивающих более слабую по сравнению с линейной функциональную зависимость размеров ячейки от числа уровней квантования выборок и повышающих, таким образом, эффективность использования элементарных ячеек при регистрации голограмм.

В настоящей работе предлагается метод кодовой записи выборок в ячейках голограмм типа Ли или Ломана, обеспечивающий логарифмическую зависимость размеров ячейки от числа уровней квантования соответственно действительной и мнимой составляющих или модуля амплитуды выборки, которая имеет вид

$$M = 2 \log_2 K, \quad (1)$$

где M — размер ячейки, K — число уровней квантования. Сущность метода состоит в использовании для кодирования выборок принципа импульсно-кодовой модуляции, хорошо известного в теории связи [5] и обобщенного нами на случай цифровой голографии.

Рассмотрим фурье-голограмму типа Ли для некоторой, определенной в конечной области $\Delta x, \Delta y$ ($\Delta x = \Delta y$) комплексной функции $u(x, y)$ ($-\Delta x/2 \leq x \leq \Delta x/2, -\Delta y/2 \leq y \leq \Delta y/2$). Предположим, что n, m — ячейка этой голограммы ($n\delta v, m\delta v$ — координаты ячейки в частотной плоскости, $\delta v = 1/\Delta x$), состоящая из 4 подъячеек, имеет структуру, показанную на рис. 1, отличающуюся от обычной тем, что в подъячейках вместо одиночных апертур изображены две одинаковые последовательности $\{l'\}$ соприкасающихся друг с другом апертур ($l' = 1, 2, \dots, L, L = M/2$). Все апертуры имеют одинаковые, неизменные в процессе кодирования, размеры, равные $\tau_1 \times \tau_2$, и рассматриваются как потенциальные, на месте которых могут быть построены реальные, т. е. пропускающие излучение, апертуры. Апертуры последовательностей с одним и тем же значением индекса l' располагаются симметрично относительно оси OO' на расстоянии $2d_{l'}$ друг от друга.

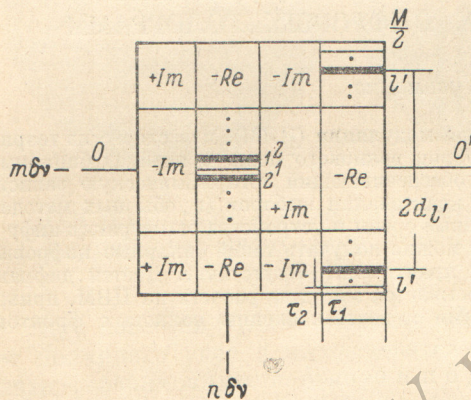


Рис. 1. Структура n, m -ячейки бинарной голограммы типа ИКМ-Ли. Параметры ячейки выражены в единицах $\delta v = 1/\Delta x$.

Используя терминологию теории ИКМ временных сигналов, назовем кодом полный набор комбинаций, которые можно составить из L потенциальных апертур и которые различаются между собой либо расположением и количеством, либо только расположением апертур. Число таких комбинаций равно

$$\sum_{k=0}^L C_L^k = 2^L, \quad (2)$$

где C_L^k — число сочетаний из L по k . Этот код есть тот, изменяющийся в определенных пределах, свободный параметр каждой подъячейки, который, как будет показано ниже, можно использовать для кодирования в них составляющих выборки. Предположим, что в каждой из соответствующих подъячеек построены две группы реальных апертур, соответствующие одной и той же комбинации потенциальных апертур $\{l'\}$ — последовательности. Эти (располагающиеся симметрично относительно оси OO') группы апертур определенным образом связаны со значениями действительной и мнимой составляющих выборки. Обозначим через $(l')_{nmk}$ совокупность упорядоченных по величине чисел, представляющих собой номера апертур, образующих в k -й подъячейке ($k = 1, 2, 3, 4$) n, m -ячейку указанную группу реальных апертур.

Тогда на основе изложенного амплитудное пропускание фурье-голограммы Ли, содержащей $(N + 1) \times (N + 1)$ ячеек, можно записать в виде

$$T(v_x, v_y) = \sum_{n, m = -\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \sum_k \sum_{(l')_{nmk}} \text{rect} \left[\frac{v_x - \left(n + \frac{k-2}{4} \right) \delta v}{\tau_1 \delta v} \right] \times \left\{ \text{rect} \left[\frac{v_y - (m + d_{l'}) \delta v}{\tau_2 \delta v} \right] + \text{rect} \left[\frac{v_y - (m - d_{l'}) \delta v}{\tau_2 \delta v} \right] \right\}. \quad (3)$$

Пусть восстановление изображения от этой голограммы производится по оптической схеме, отличающейся от описанной в [3] (рис. 1) лишь тем, что точечный источник света в плоскости P_1 помещается в точку x_0, y_0 вместо $x_0, 0$ и, таким образом, голограмма в плоскости P_2 освещается наклонной плоской волной вида $\exp j2\pi(x_0 v_x + y_0 v_y)$ вместо $\exp j2\pi x_0 v_x$.

Восстановленное в плоскости P_3 изображение представляет собой фурье-преобразование распределения поля $T(v_x, v_y) \exp j2\pi(x_0 v_x + y_0 v_y)$ и описывается формулой

$$a(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(v_x, v_y) \exp j2\pi[(x+x_0)v_x + (y+y_0)v_y] dv_x dv_y = \\ = \tau_1 \tau_2 (\delta v)^2 \operatorname{sinc}_1(x) \operatorname{sinc}_2(y) \sum_n \sum_k \sum_{(l)nmk} [\exp_{nmkl}^{(+)}(x, y) + \exp_{nmkl}^{(-)}(x, y)], \quad (4)$$

где

$$\operatorname{sinc}_1(x) = \operatorname{sinc}[\tau_1 \delta v (x+x_0)],$$

$$\operatorname{sinc}_2(y) = \operatorname{sinc}[\tau_2 \delta v (y+y_0)],$$

$$\exp_{nmkl}^{(+)}(x, y) = \exp j\delta \left[(x+x_0) \left(n + \frac{k-2}{4} \right) + (y+y_0)(m+d_l) \right],$$

$$\exp_{nmkl}^{(-)}(x, y) = \exp j\delta \left[(x+x_0) \left(n + \frac{k-2}{4} \right) + (y+y_0)(m-d_l) \right], \quad \delta = 2\pi\delta v.$$

Потребуем, чтобы функция распределения поля $a(x, y)$ совпадала с точностью до константы с функцией $u(x, y)$ в области определения последней, т. е. чтобы

$$\operatorname{rect} \frac{x}{\Delta x} \operatorname{rect} \frac{y}{\Delta y} a(x, y) = \operatorname{const} u(x, y) \quad \text{для} \quad |x| \leq \frac{\Delta x}{2}, \quad |y| \leq \frac{\Delta y}{2}. \quad (5)$$

Введем функцию $v(x, y)$, связанную с $u(x, y)$ соотношением

$$u(x, y) = \operatorname{sinc}_1(x) \operatorname{sinc}_2(y) v(x, y). \quad (6)$$

Ограничиваясь конечным числом дискретных отсчетов спектра функции $v(x, y)$, можем записать

$$v(x, y) = \operatorname{rect} \frac{x}{\Delta x} \operatorname{rect} \frac{y}{\Delta y} \sum_{n, m=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} V_{nm} \exp j\delta (xn + ym), \quad (7)$$

$$V_{nm} = \left(\frac{1}{\Delta x} \right)^2 \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{u(x, y)}{\operatorname{sinc}_1(x) \operatorname{sinc}_2(y)} \exp [-j\delta (xn + ym)] dx dy. \quad (8)$$

Используя (4) (5) для выполнения интегрирования в (8), получаем

$$\tilde{V}_{qp} = \sum_n \sum_k \sum_{(l)nmk} \left\{ \exp [j\delta x_0 (k-2)/4] \exp j\delta (x_0 n + y_0 m) \operatorname{sinc} \left(n - p + \frac{k-2}{4} \right) \times \right. \\ \left. \times [\operatorname{sinc}(m - q + d_l) \exp (j\delta y_0 d_l) + \operatorname{sinc}(m - q - d_l) \exp (-j\delta y_0 d_l)] \right\}, \quad (9)$$

$$\text{где } \tilde{V}_{qp} \equiv \frac{\operatorname{const}}{\tau_1 \tau_2 (\delta v)^2} V_{qp}.$$

Значения x_0, y_0 удобно выбрать такими, чтобы выполнялись условия

$$x_0 \delta v = 1, \quad y_0 \delta v = Y \quad (Y - \text{любое целое число}). \quad (10)$$

Выделяя в сумме по n, m в правой части (9) отдельно член с $n=p, m=q$, используя условие (10), после простых преобразований получаем

$$\tilde{V}_{qp} = \left(c_2 \sum_{(l)qp2} D_l - c_4 \sum_{(l)qp4} D_l \right) - \left(c_4 \sum_{(l)qp4} D_l - c_2 \sum_{(l)qp2} D_l \right) + 2^1 Q_{qp} + \\ + j \left[\left(c_3 \sum_{(l)qp3} D_l - c_1 \sum_{(l)qp1} D_l \right) - \left(c_1 \sum_{(l)qp1} D_l - c_3 \sum_{(l)qp3} D_l \right) + 2^2 Q_{qp} \right], \quad (11)$$

где

$$c_k = 2 \operatorname{sinc} \left(\frac{k-2}{4} \right) \quad (k = 1, 2, 3, 4),$$

$$D_l = \operatorname{sinc}(d_l) \cos(2\pi Y d_l) > 0, \quad d_l = \frac{1}{2}(2l-1)d_0, \quad d_0 = 1/M, \quad l = 1, 2, \dots, M/4,$$

$$D_{\bar{l}} = \operatorname{sinc}(d_{\bar{l}}) \cos(2\pi Y d_{\bar{l}}) < 0, \quad d_{\bar{l}} = \frac{1}{2}(2\bar{l}-1)d_0, \quad \bar{l} = M/4 + 1, \dots, M/2,$$

$${}^1Q_{qp} = -\frac{1}{2} \sum'_{n,m} (-1)^{m-q+n-p} \sum_k \sum_{(l')_{nmk}} \{[\pi(m-q+d_{l'})]^{-1} - (-1)^k [\pi(m-q-d_{l'})]^{-1}\} [\pi(n-p+(k-2)/4)]^{-1} \sin(\pi(k-2)/4) \times \\ \times \sin(\pi d_{l'}) \cos(k\pi/2 - 2\pi Y d_{l'}), \quad (11')$$

$${}^2Q_{qp} = -\frac{1}{2} \sum'_{n,m} (-1)^{m-q+n-p} \sum_k \sum_{(l')_{nmk}} \{[\pi(m-q+d_{l'})]^{-1} + (-1)^k [\pi(m-q-d_{l'})]^{-1}\} [\pi(n-p+(k-2)/4)]^{-1} \sin(\pi(k-2)/4) \times \\ \times \sin(\pi d_{l'}) \sin(k\pi/2 + 2\pi Y d_{l'}), \quad (11'')$$

$$l' = 1, 2, \dots, M/2, \quad q, p = -N/2, \dots, N/2.$$

Штрих у суммы по n, m означает отсутствие в ней члена с индексами $n=p, m=q$.

Представим $[{}^1] \tilde{V}_{qp}$ в виде

$$\tilde{V}_{qp} = \tilde{V}'_{qp} + j\tilde{V}''_{qp} = (\tilde{V}_2 - \tilde{V}_4)_{qp} + j(\tilde{V}_3 - \tilde{V}_1)_{qp}, \quad (12)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \tilde{V}_2 &= \begin{cases} \tilde{V}' & \tilde{V}' \geq 0, \\ 0 & \tilde{V}' < 0; \end{cases} \\ \tilde{V}_4 &= \tilde{V}_2 - \tilde{V}' & \tilde{V}' \geq 0; \\ \tilde{V}_3 &= \begin{cases} \tilde{V}'' & \tilde{V}'' \geq 0, \\ 0 & \tilde{V}'' < 0; \end{cases} \\ \tilde{V}_1 &= \tilde{V}_3 - \tilde{V}'' & \tilde{V}'' \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(для простоты записи индексы q, p в (13) опущены). Таким образом, по определению \tilde{V}_{qpk} всегда являются действительными и неотрицательными числами. Из (11), (12) получаем

$$\left. \begin{aligned} c_2 \sum_{(l)_{qp2}} D_l - c_4 \sum_{(l)_{qp4}} D_l &= \tilde{V}_{qp2} - {}^1Q_{qp}, \\ c_4 \sum_{(l)_{qp4}} D_l - c_2 \sum_{(l)_{qp2}} D_l &= \tilde{V}_{qp4} + {}^1Q_{qp}, \\ c_3 \sum_{(l)_{qp3}} D_l - c_1 \sum_{(l)_{qp1}} D_l &= \tilde{V}_{qp3} - {}^2Q_{qp}, \\ c_1 \sum_{(l)_{qp1}} D_l - c_3 \sum_{(l)_{qp3}} D_l &= \tilde{V}_{qp1} + {}^2Q_{qp}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Формулы (14) являются исходными при получении голограммы. Из них видно, что расчет голограммы сводится к решению «самосоглавленной» задачи, т. е. дифракционная структура q, p -ячейки, которую нам необходимо найти, определяется не только значением \tilde{V}_{qp} , но также структурой всех остальных ячеек голограммы. Метод решения этой задачи, позволяющий определить все $(l)_{qpk}$ и $(\bar{l})_{qpk}$ (которые вместе образуют $(l')_{qpk}$), а с ними — все группы апертур, реализуемые в q, p, k -подъяхчках, демонстрируется ниже на примере одномерной голограммы.

Для фурье-голограммы типа Ломана с ИКМ структурой элементарной ячейки, описываемой функцией пропускания

$$T'(\nu_x, \nu_y) = \sum_{n, m} \sum_{(l')_{nm}} \text{rect}\left(\frac{\nu_x - (n + P_{nm})\delta\nu}{\tau'_1\delta\nu}\right) \times \\ \times \left[\text{rect}\left(\frac{\nu_x - (m + d_{l'})\delta\nu}{\tau'_2\delta\nu}\right) + \text{rect}\left(\frac{\nu_y - (m - d_{l'})\delta\nu}{\tau'_2\delta\nu}\right) \right], \quad (15)$$

нетрудно проделать такое же, как для ИКМ-Ли-голограммы, рассмотрение и получить расчетные формулы для определения $(l')_{nm}$ и P_{nm} через модули амплитуд и фазы компонент спектра функции $v(x, y)$. Восстановление этого типа голограмм осуществляется по указанной выше оптической схеме, обеспечивающей наклон по двум осям ν_x, ν_y волны, падающей на голограмму.

Метод расчета голограмм на ЦВМ. Характеристика квантования. Эксперимент

1. Применим уравнения (14) для расчета одномерной фурье-голограммы Ли с ИКМ структурой ячеек. Для этого в уравнениях положим $m=q=\text{const}$. Для упрощения последующего изложения (а также составления программы для ЦВМ) будем считать, что в расчете используются лишь величины $D_l > 0$, а все

$$D_l \equiv 0 \quad (16)$$

(это соответствует использованию для регистрации выборки лишь 1/2 площади ячейки). Нетрудно видеть, что в этом случае единая система уравнений (14) распадается на две независимые системы (одна соответствует значениям $k=2, 4$, вторая — $k=3, 1$). Эта независимость означает, что в одномерной голограмме структура подъячеек, служащих для воспроизведения действительных составляющих выборок, не зависит от структуры подъячеек, служащих для воспроизведения мнимых составляющих выборок и наоборот. Указанные системы уравнений подобны между собой, поэтому рассмотрим процесс решения одной из них, например системы для $k=3, 1$. Последняя легко сводится к системе $N+1$ линейных алгебраических уравнений относительно $N+1$ неизвестных путем введения замены $x_{pk} = \sum_{(l)_{pk}} D_l$

$$x_{pk} = a_k \tilde{V}_{pk} - b_k {}^2Q_p, \quad (17)$$

где

$$a_k = [2 \text{sinc}(k-2)/4]^{-1}, \quad b_k = a_k(k-2), \quad k=3, 1.$$

Система уравнений (17) решается методом итераций [6]. В нулевом приближении полагаем ${}^2Q_p = 0$ и получаем

$$x_{pk}^0 = a_k \tilde{V}_{pk}$$

Начиная с первого приближения и далее учитываем поправку 2Q_p и последовательно получаем

$$x_{pk}^{(1)} = a_k \tilde{V}_{pk} - b_k {}^2Q_p(x_{pk}^{(0)}), \\ x_{pk}^{(2)} = a_k \tilde{V}_{pk} - b_k {}^2Q_p(x_{pk}^{(1)}) \text{ и т. д.}$$

Значение ${}^2Q_p^{(n)}$ для n -го приближения определяется путем подстановки в формулу для 2Q_p значений $x_{pk}^{(n-1)}$, вычисленных в $(n-1)$ приближении.

Определение $(l)_{pk}$ по вычисленным с заданной точностью x_{pk} осуществляется посредством реализации в ЦВМ процедуры взвешивания, эквивалентной процедуре последовательного весового кодирования, применяемой для импульсно-кодовой модуляции временных сигналов [5].

Производится взвешивание величины x_{pk} . В качестве набора весов служит набор значений D_l ($l=1, 2, \dots, M/4$). Определяется совокупность весов, в сумме дающих значение x_{pk} (с точностью до ошибки квантования), а вместе с ней и $(l)_{pk}$ — совокупность номеров искомой группы апертур.

При вычислении суммы по n в выражении для 2Q_p в процессе итераций нет необходимости вычислять эту сумму полностью, поскольку члены ее быстро убывают с ростом $|n-p|$, достаточно вычислять несколько членов. Входящая в \tilde{V}_p константа определяется из соотношения

$$\frac{\text{const}}{\tau_1 \tau_2 (\delta v)^2} = \frac{2 \sin c [(k-2)/4]}{|V|^{mm}} \sum_{l=1}^{M/4} D_l,$$

где $|V|^{mm} = \max \{|V'_p|^{\max}, |V''_p|^{\max}\}$, $k=1, 2, 3$ или 4 в зависимости от того, в какой подъячейке должна быть записана выбранная максимальная величина.

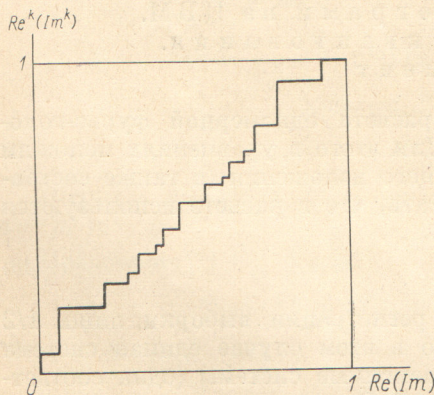


Рис. 2. Пример характеристики квантования нормированных значений действительной и мнимой составляющих выборки в ячейке ИКМ-Лиголограммы с $M \times M = 16 \times 16$ при $D_l = 0, Y = 1$.

Характеристика квантования является неравномерной (рис. 2). Ясно, что приведенная на рис. 1 структура ИКМ ячейки и соответствующая ей характеристика квантования не являются единственно возможными. Размещая апертуры последовательностей $\{l'\}$ неэквидистантно, можно реализовать множество других характеристик квантования, в том числе и равномерную. Однако при этом частично (а для малых M — полностью) утрачивается преимущество ИКМ метода кодирования, заключенное в формуле (1) перед обычными методами Ли и Ломана, так как всегда будем иметь $L < M/2$.

3. Изложенный метод получения ИКМ-Ли-голограмм проверен экспериментально. На рис. 3, а дана увеличенная фурье-голограмма типа Ли с ИКМ-структурой ячеек для функции $f(x) = \exp(-2x) - \exp(-4x)$, $0 \leq x \leq 1.35$. Число ячеек 23. Параметры ячеек: площадь — 66×66 мкм², $M \times M = 32 \times 32$, $K = 2^8$, $\tau_1 = 1/4$. При определении групп апертур в ячейках по формулам (14) (с учетом $m = q = \text{const}$) достаточная точность вычислений обеспечивалась 4-м порядком итераций, причем в данном частном случае итерационная процедура применялась для

¹ Для определения совокупности всех, реализуемых из L потенциальных апертур, групп апертур и соответствующих им квантованных значений удобно использовать следующее правило. Все числа от 0 до $2^L - 1$ записываются в виде L -разрядных двоичных чисел. При этом номер двоичного разряда считается номером апертуры, а стоящая в нем 1 или 0 — наличием или отсутствием апертуры под этим номером.

расчета лишь (l_{pk}) ($k=3, 1$)-групп чисел, так как все (l_{pk}) ($k=2, 4$)-группы определялись для $k=2$, а в этом случае, как видно из (11'), имеем ${}^1Q_p=0$. Значение параметра Y , определяющего дифракционный порядок по оси y , в котором будет восстанавливаться изображение, принималось равным единице.

На рис. 3, б дана обычная фурье-голограмма Ли на 23 ячейки для той же функции $f(x)$ соответственно с параметрами ячеек: 66×66 мкм², $M \times M = 32 \times 32$, $K=32$, $\tau_1=1/4$.

Восстановление изображений осуществлялось по указанной выше оптической схеме с помощью He-Ne лазера ЛГ-38 (фокусное расстояние линзы L_2 равнялось $f=1600$ мм). ИКМ-Ли-голограмма дает в выходной плоскости четыре идентичных изображения, располагающиеся в ± 1 , ± 1 порядках по осям x, y , голограмма Ли, как обычно, — два изображения в ± 1 порядках по оси x .

Одно из изображений выделялось маской и фотометрировалось. Применялась мультипликация голограмм (набирались пакеты из 20 голограмм) с целью повышения яркости изображения при одновременном сжатии его по оси y в плоскости P_3 .

Это снижало требования к чувствительности фотометра и позволяло повысить точность определения оси, вдоль которой производилось фотометрирование. На рис. 3, в — результаты измерений. Видно, что качество воспроизведения функции $f^2(x)$ в случае ИКМ-Ли-голограммы выше, нежели в случае обычной Ли. Улучшение связано прежде всего с уменьшением шумов квантования при новом способе кодирования, а также с тем, что ИКМ-метод более «технологичен» — относительная ошибка в размерах отдельных апертур, вносимая графопроектировщиком и неидеальностью регистрирующей среды, практически постоянна по всей голограмме, тогда как в обычном методе она различна для различных ячеек. Последнее является источником дополнительного шума в обычной Ли-голограмме.

Измеренная дифракционная эффективность голограмм порядка 0.4% для ИКМ-Ли, 4.2% — для обычной Ли.

4. Отметим некоторые очевидные преимущества и недостатки ИКМ-метода кодирования. Основное преимущество — уже отмечавшаяся логарифмическая зависимость размеров элементарной ячейки от числа уровней квантования выборки, которая позволяет избежать ошибку квантования сделать исчезающе малой уже при сравнительно небольших M . Например, при $M=20$ число квантованных значений выборки, реализуемое в ячейке голограммы типа Ли, равно 2^{20} . Таким образом, становится реальной возможность получения бинарных голограмм, в которых шум квантования практически отсутствует. Однако следует считаться с тем фактом, что время расчета таких голограмм на ЦВМ может быть сравнительно большим. Соответственно возрастет и время построения голограммы (например, с помощью электронного графопроектировщика). ИКМ-Ли-голограммы имеют также более низкую по сравнению с обычными дифракционную эффективность.

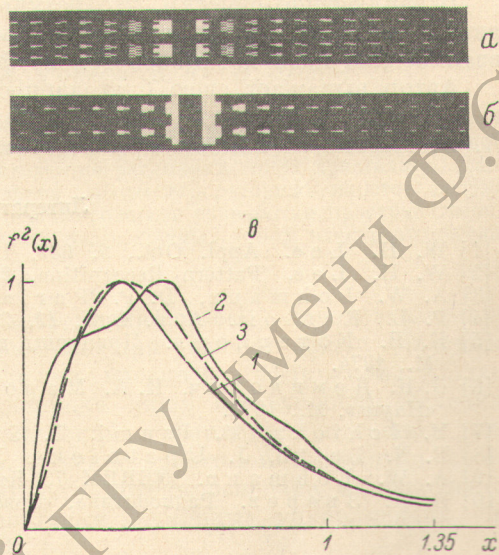


Рис. 3. ИКМ-Ли-голограмма (а), обычная Ли-голограмма (б) и в — результат фотометрирования изображения, восстановленного голограммой а (1) голограммой б (2), точный вид функции $f^2(x)$ (3).

Переходя от кода с двоичным основанием к коду с m -ным основанием ($m=3, 4, \dots$), можно применять ИКМ метод кодирования для получения голограмм с числом градаций пропускания в элементарной ячейке $m > 2$. Число уровней квантования выборок при этом становится равным m^{2L} . Для построения таких голограмм могут использоваться сканирующие электронные графопостроители типа, описанного в [7].

Для голограмм типа Ломана метод менее эффективен, так как в них с его помощью можно увеличить число квантованных значений лишь модуля амплитуды выборки.

Если не требуется особая точность восстановления изображений, то при расчете можно ограничиваться нулевым приближением, при этом, как показывает эксперимент, за счет незначительного ухудшения точности восстановления достигается значительная экономия машинного времени.

В заключение отметим, что результаты данной работы подчеркивают вновь неоднократно отмечавшуюся многими авторами [8-10] глубокую взаимосвязь идей и методов голографии и теории связи.

Автор выражает свою благодарность Н. Г. Находкину за внимание к работе и высказанные советы и замечания. Автор благодарит также А. Б. Пасько за помощь при изготовлении голограмм.

Литература

- [1] W. H. Lee. Appl. Opt., 9, 639, 1970.
- [2] W. H. Lee, Pattern Recognition, 2, 127, 1970.
- [3] A. W. Lohmann, D. P. Paris. Appl. Opt., 6, 1739, 1967.
- [4] P. L. Ransom. Appl. Opt., 11, 2554, 1972.
- [5] К. В. Кэтермоул. Принципы импульсно-кодовой модуляции. «Связь», М., 1974.
- [6] Б. В. Демидович, И. А. Марон. Основы вычислительной математики. «Наука», М., 1970.
- [7] Y. Ichioka, M. Izumi, T. Suzuki. Appl. Opt., 10, 403, 1971.
- [8] E. N. Leith, J. Upatnieks. J. Opt. Soc. Am., 52, 1123, 1962.
- [9] A. W. Lohmann. NEREM 73 Rec., Part 2, 148, 1973.
- [10] В. А. Зверев. Радиоптика. «Советское радио», М., 1975.

Поступило в Редакцию 5 апреля 1976 г.