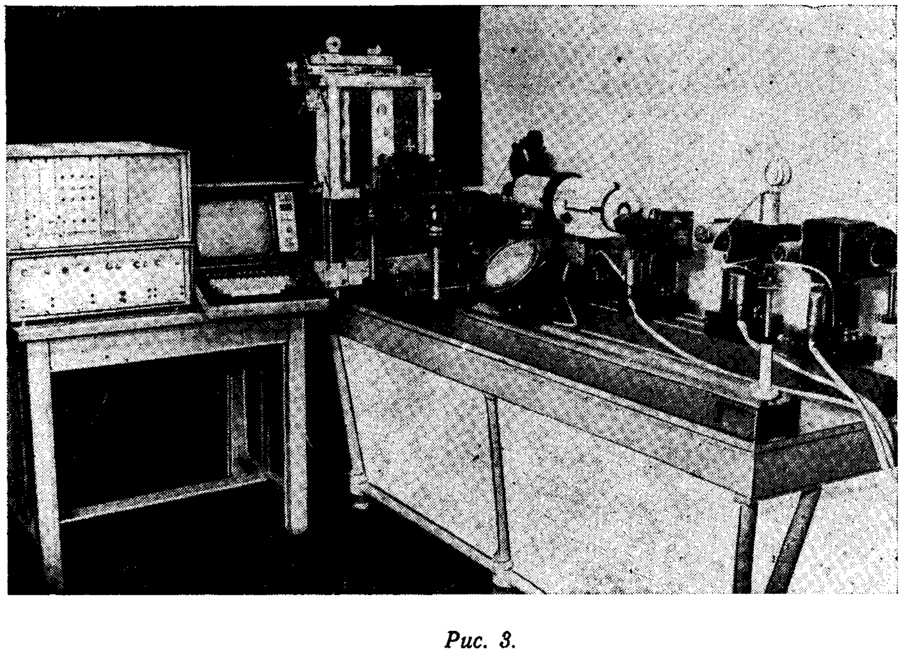

Рис. 3.

участка фотоснимка составляет 1 с. Внешний вид оптической части процессора показан на рис. 3.

В целом оптико-электронный процессор является универсальным устройством для распознавания изображений по системе признаков, каждый из которых представляет собой усредненную по заранее заданной области интенсивность анализируемого изображения или его спектра. В последнем случае фильтр должен устанавливаться в частотной плоскости. Если система признаков выбрана, то процессор позволяет за короткое время оценить эффективность применения различных решающих правил. Особенно целесообразно использование процессора в тех случаях, когда области изображения объекта, по которым необходимо проводить усреднение, достаточно сложны.

Поступила в редакцию 13 февраля 1975 г.

УДК 621.378 : 681.332.5

И. С. ГИБИН, М. А. ГОФМАН, Ю. В. ЧУГУЙ
(Новосибирск)

ОБОБЩЕННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ КОДИРУЮЩЕЙ ПЛАСТИНЫ

Известные когерентно-оптические методы обобщенного спектрального анализа изображений основаны на использовании кодирующей пластины (матрицы голограмм), содержащей $N \times N$ изображений базисных функций разложения $\varphi_{kn}(x, y)$ [1, 2]. В общем случае количество определяемых спектральных компонент равно числу выборок анализируемого изображения и в реальных ситуациях может достигать величины порядка 500×500 (телевизионный стандарт) и более. Очевидно, что подготовка и голографическая регистрация такого большого количества изображений требуют значительных затрат труда и времени и, как следствие, приводит к необходимости повышения качества элементов оптической системы.

В работе предложен параллельный голографический метод формирования изображений базиса из $N \times N$ двумерных функций разложения с помощью $2N$ одномерных ортогональных составляющих этих функций. Рассмотрена структура оптической системы, применяемой как для формирования кодирующей пластины, так и для спектрального анализа тестовых изображений. Приведены результаты экспериментального исследования.

Описание метода. Известно, что двумерные функции большинства систем разложения могут быть представлены произведением двух ортогональных одномерных функций, т. е. в виде

$$\varphi_{kn}(x,\ y) = \varphi_k(x)\varphi_n(y), \qquad (1)$$
$$k=1,\ 2,\ \ldots,\ N;\ n=1,\ 2,\ \ldots,\ N.$$

Если функции $\varphi_k(x)$ и $\varphi_n(y)$ записать в виде изображений $S_k(x) = \varphi_k^{1/2}(x)\,\mathrm{rect}\left(\frac{x}{a}\right)\mathrm{rect}\ \left(\frac{y}{b}\right)$ и $S_n(y) = \varphi_n^{1/2}(y)\,\mathrm{rect}\left(\frac{x}{a}\right)\mathrm{rect}\ \left(\frac{y}{b}\right)$, $|x| \leqslant a/2$, $|y| \leqslant b/2$, в вертикальную и горизонтальную линейки ячеек оптической памяти, а затем их одновременно воспроизвести с наложением в когерентном свете на фотоматериале, то в результате регистрации интерференционной картины получим голограмму, позволяющую восстановить изображения всех взаимных произведений $S_k(x)S_n(y) = S_{kn}(x,\ y)$.

В процессе анализа изображение проектируется на полученную голограмму, которую в дальнейшем будем называть кодирующей пластиной. Результат анализа получается в виде матрицы световых распределений, интенсивность каждого из которых пропорциональна значениям спектральных компонент.

Покажем, что сформированная таким образом кодирующая пластина при анализе формирует $N \times N$ разделяющихся в пространстве значений спектральных компонент.

В качестве линейки оптической памяти может быть использована линзорастровая или голографическая память. Тогда в задних фокальных плоскостях линз растра или в плоскости голограмм при освещении памяти плоской когерентной световой волной получим линейку (с шагом $\Delta\xi$ или $\Delta\eta$) неперекрывающихся световых распределений, пропорциональных пространственно-частотным спектрам изображений исходных функций

$$L(u, v) = \sum_{k=1}^{N} \Phi_k\left[u - \left(k - \frac{N+1}{2}\right)\Delta u, v\right], \qquad (2)$$

где $u = \frac{2\pi}{\lambda f}\xi$, $v = \frac{2\pi}{\lambda f}\eta$ — пространственные частоты; ξ и η — линейные координаты частотной плоскости; $\Phi_k(u,\ v)$ — Фурье-спектр изображения $S_k(x)$; $\Delta u = \frac{2\pi}{\lambda f}\Delta\xi$.

Для двух линеек ячеек памяти (горизонтальных и вертикальной), размещенных в одной плоскости и на расстоянии 2δ друг от друга, в частотной плоскости имеем

$$L(u;\ v) = \sum_{k=1}^{N} \Phi_k\left[u - \left(k - \frac{N+1}{2}\right)\Delta u - \Delta,\ v\right] +$$
$$+ \sum_{n=1}^{N} \Phi_n\left[u + \Delta,\ v - \left(n - \frac{N+1}{2}\right)\Delta v\right], \qquad (3)$$

где $\Delta = \frac{2\pi}{\lambda f}\,\delta$, $\Delta v = \frac{2\pi}{\lambda f}\Delta\eta$. Выполнив над (3) операцию преобразования Фурье, получим амплитудное распределение света

$$A(x, y) = \sum_{k=1}^{N} S_k(x)\, e^{-j\left[\left(k-\frac{N+1}{2}\right)\Delta u+\Delta\right]x} +$$

$$+ \sum_{n=1}^{N} S_n(y)\, e^{j\left[x\Delta - y\left(n-\frac{N+1}{2}\right)\Delta v\right]}.$$

Регистрируя это распределение на фоточувствительном материале, получим голограмму, пропускание которой пропорционально функции

$$J(x, y) = A(x, y)\, A^*(x, y) = \sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N} S_k(x)\, S_l(x) \times$$

$$\times e^{j(l-k)\Delta u x} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{l=1}^{N} S_n(y)\, S_l(y)\, e^{j(l-n)\Delta v y} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{N}\sum_{n=1}^{N} S_k(x)\, S_n(y)\, e^{j\left\{\left[\left(\frac{N+1}{2}-k\right)\Delta u - 2\Delta\right]x + \left(n-\frac{N+1}{2}\right)\Delta v y\right\}} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{N}\sum_{n=1}^{N} S_k(x)\, S_n(y)\, e^{-j\left\{\left[\left(\frac{N+1}{2}-k\right)\Delta u - 2\Delta\right]x + \left(n-\frac{N+1}{2}\right)\Delta v y\right\}}. \qquad (4)$$

Интерес представляют третье или четвертое слагаемые выражения (4). Видно, что изображение каждой из функций $S_{kn}(x, y) = S_k(x)S_n(y)$ записано на собственной несущей, определяемой коэффициентами k и n. Если расстояние между линейками выбрать исходя из условия $2\Delta > 1{,}5\,N\Delta u$, то первые два слагаемых выражения (4) пространственно разделяются с третьим и четвертым.

Таким образом, в результате голографической регистрации формируется кодирующая пластина, представляющая собой суперпозицию голограмм сфокусированных изображений двумерных функций разложения.

При анализе на кодирующую пластину проектируется анализируемое изображение в когерентном свете с амплитудным распределением $f^{1/2}(x, y)$. Тогда за пластиной в одном из дифракционных порядков (для определенности, например, в $+1$ порядке) амплитудное распределение света будет

$$A(x, y) = f^{1/2}(x, y) \sum_{k=1}^{N}\sum_{n=1}^{N} S_{kn}(x, y)\, e^{j\left\{\left[\left(\frac{N+1}{2}-k\right)\Delta u - 2\Delta\right]x + \left(n-\frac{N+1}{2}\right)\Delta v y\right\}}.$$

После преобразования Фурье, выполняемого над этим распределением, получим

$$M(u, v) = \sum_{k=1}^{N}\sum_{n=1}^{N} \Phi_{kn}\left[u - \left(k - \frac{N+1}{2}\right)\Delta u - 2\Delta,\ v + \left(n - \frac{N+1}{2}\right)\Delta v\right] \otimes$$

$$\otimes\, G(u, v), \qquad (5)$$

где $G(u, v)$ — Фурье-образ изображения $f^{1/2}(x, y)$, а знак $\otimes$ — обозначает операцию свертки.

Для раздельного считывания световых потоков от каждого слагаемого путем детектирования и интегрирования световых распределений необходимо, чтобы отдельные слагаемые суммы (5) в пространстве практически не перекрывались и локализовались в отдельных областях выходной плоскости Ω_{kn}. Это условие накладывает ограничение на выбор параметров Δu и Δv. Если $\omega_{\max}$ — максимальная информативная полоса пространственных частот изображения $f^{1/2}(x, y)$, а u_{max} — максимальная полоса частот изображения функции разложения $S_{kn}(x, y)$, то можно считать, что эффективная ширина светового распределения $\Phi_{kn} \otimes G$ равна сумме $\omega_{max}+u_{max}$. Поэтому параметры Δu и Δv должны быть выбраны так, чтобы выполнялось условие

$$\begin{aligned} \Delta u &> \omega_{max}+u_{max}; \\ \Delta v &> \omega_{max}+u_{max}. \end{aligned} \tag{6}$$

В результате выполнения условия (6) при детектировании и интегрировании в пределах областей Ω_{kn} получим матрицу коэффициентов

$$\| C_{kn} \| = \sum_{k=1}^{N} \sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_{kn}} \left\{ \Phi_{kn} \left[u - \left(k - \frac{N+1}{2} \right) \Delta u - 2\Delta,\ v + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \left(n - \frac{N+1}{2} \right) \Delta v \right] \otimes G(u, v) \right\}^2 du dv. \tag{7}$$

Если размеры Ω_{kn} выбрать такими, что основная часть энергии kn-го светового распределения заключена в этой области, то можно записать

$$c_{kn} = \iint_{\Omega_{kn}} \left\{ \Phi_{kn} \left[u - \left(k - \frac{N+1}{2} \right) \Delta u - 2\Delta,\ v + \left(n - \frac{N+1}{2} \right) \Delta v \right] \otimes \right.$$
$$\left. \otimes\ G(u, v) \right\}^2 du dv = \int_{-\infty}^{\infty}\!\!\int [S_{kn}(x, y) f^{1/2}(x, y)]^2 dx dy =$$
$$\int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \varphi_{kn}(x, y) f(x, y) dx dy. \tag{8}$$

Таким образом, в выходной плоскости получается матрица световых распределений, интенсивность которых пропорциональна значениям спектральных компонент.

Оптическая система. На рис. 1 приведена схема оптической системы, реализующей рассматриваемый метод анализа, где *1* — плоскость анализируемого изображения; *2*, *4* — объективы, проектирующие изображение $f(x, y)$ из плоскости *1* в плоскость кодирующей пластины *5*; *3* — плоскость ячеек оптической памяти. Объективы *4* и *6* выполняют преобразование Фурье и проектируют изображение из плоскости *3* в выходную плоскость *7*.

В процессе формирования кодирующей пластины в плоскость *3* помещаются две линейки ячеек линзорастровой или голографической памяти и при помощи объектива *4* в плоскости *5* получаем световое распределение, интенсивность которого соответствует выражению (4).

При анализе кодирующая пластина помещается в плоскость *5*, а анализируемое изображение проектируется объективами *2*, *4* из плоскости *1* в плоскость *5* на кодирующую пластину. Тогда, производя объективом *6* преобразование Фурье над световым распределением, в плоскости *7* получаем матрицу коэффициентов c_{kn}, соответствующих выра-

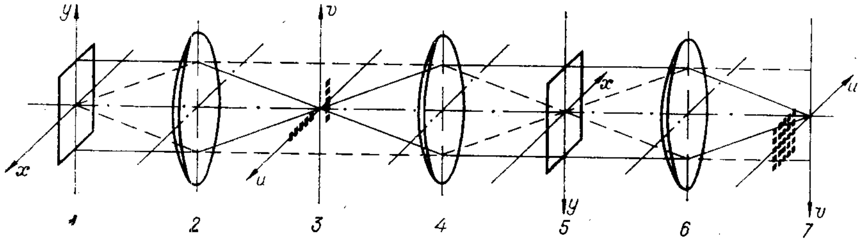

Рис. 1.

жению (8). Считывание значений коэффициентов производится матричным фотоприемником, помещаемым в плоскость 7.

Определение знака компонент. Трудности формирования знакопеременных функций в оптических системах обусловливают представление этих функций в виде

$$\varphi_k(x) = \varphi_k^+(x) - \varphi_k^-(x); \qquad (9)$$

$$\varphi_n(y) = \varphi_n^+(y) - \varphi_n^-(y).$$

С учетом (9) из соотношения (1) получим

$$\varphi_{kn}(x, y) = \varphi_k^+(x)\varphi_n^+(y) + \varphi_k^-(x)\varphi_n^-(y) - \varphi_k^+(x)\varphi_n^-(y) - \varphi_k^-(x)\varphi_n^+(y),$$

а

$$c_{kn} = \int\int \varphi_{kn}(x, y) f(x, y)\, dxdy = c_{kn}^{++} + c_{kn}^{--} - c_{kn}^{+-} - c_{kn}^{-+}. \qquad (10)$$

Из выражения (10) следует, что для получения значения коэффициентов c_{kn} необходимо алгебраически суммировать четыре составляющие. В ячейках памяти в этом случае записываются изображения положительных и отрицательных частей функций $\varphi^+(x)$, $\varphi^+(y)$ и $\varphi^-(x)$, $\varphi^-(y)$, которые в процессе формирования кодирующей пластины одновременно проектируются в плоскость 5. При анализе в плоскости 7 получается весь набор составляющих $c_{kn}^{++}, c_{kn}^{--}, c_{kn}^{+-}, c_{kn}^{-+}$, необходимый для вычисления коэффициентов c_{kn} в соответствии с (10). Порядок расположения ячеек памяти с изображениями положительных и отрицательных частей функций в плоскости 3 определяет геометрию расположения составляющих коэффициентов в плоскости 7.

На рис. 2 приведены примеры размещения ячеек памяти и соответствующих геометрических конфигураций составляющих коэффициентов. Чередование ячеек памяти с изображениями положительных и отрицательных частей функций разложения (см. верхнюю часть рис. 2) приводит к необходимости раздельного считывания составляющих коэффициентов и суммирования их на электронном уровне коммутаций элементов матричного фотоприемного устройства. На нижней части рис. 2 показано расположение ячеек памяти в плоскости 3 (см. рис. 1), при котором электронная схема коммутации в фотоприемном устройстве упрощается и уменьшается в два раза число фоточувствительных элементов. Это достигается за счет увеличения числа ячеек памяти и расположения их таким образом, что суммирование составляющих коэффициен-

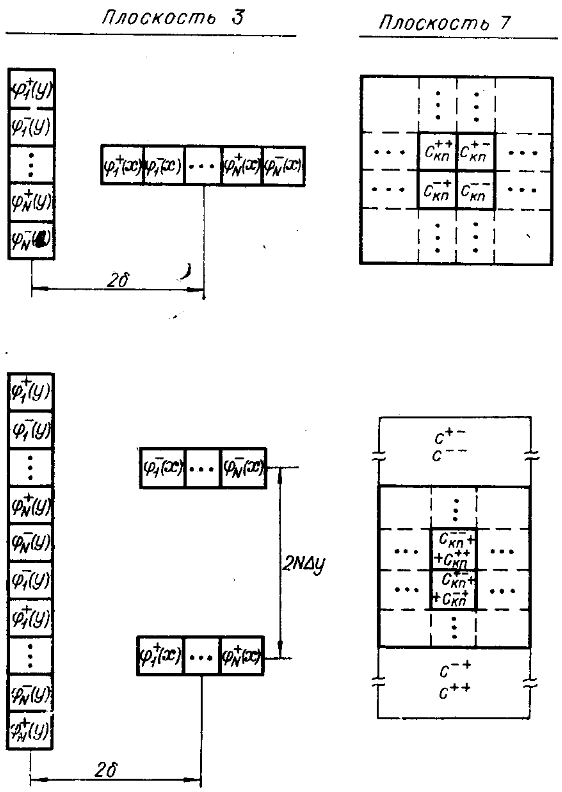

Рис. 2.

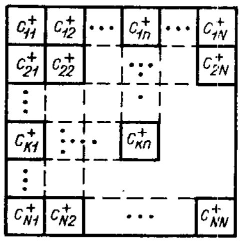

Рис. 3.

тов, имеющих одинаковый знак, производится путем их оптического наложения в плоскости фотоприемной матрицы. Отметим, однако, что требования к относительному отверстию объектива *4*, определяемому линейными размерами горизонтальной и вертикальной линеек памяти, в этом случае повышаются. Так, например, при $N=8$, $\Delta u=8\pi/3$, $f=300$ мм, $\lambda=0{,}63\cdot 10^{-3}$ мм для рис. 2, *а* имеем $D_{\text{отн}4}=1:6$, а для рис. 2,*б* — $D_{\text{отн}4}=1:3{,}5$.

Разложение по базису Уолша. Перспективность спектральных преобразований по базису Уолша неоднократно обсуждалась в литературе [3—5]. Функции Уолша являются знакопеременными и принимают значения ± 1, что обусловливает их представление в соответствии с (9). Однако представление функции Уолша возможно в виде

$$\varphi_k(x) = 2\varphi_k^+(x) - 1;$$

$$\varphi_n(y) = 2\varphi_n^+(y) - 1.$$

Тогда получаем, что

$$\varphi_{kn}(x, y) = 4\varphi_k^+(x)\,\varphi_n^+(y) - 2\varphi_k^+(x) - 2\varphi_n^+(y) + 1,$$

а

$$c_{kn} = 4c_{kn}^+ - 2c_{k1}^+ - 2c_{1n}^+ + c_{11}^+. \tag{11}$$

Обратимся теперь к диаграмме на рис. 3, соответствующей плоскости *7* (см. рис. 1). Видно, что в диаграмме присутствует полный набор коэффициентов, необходимых для получения значения любой спектральной компоненты. Процедура заключается в образовании прямоугольника из световых точек, соответствующих коэффициентам c_{kn}^+, c_{k1}^+, c_{1n}^+, c_{11}^+ и подстановке угловых значений в выражение (11). Значения c_{k1} и c_{1n} могут быть определены по формулам

$$c_{k1} = 2c_{k1}^+ - c_{11}^+;$$

$$c_{1n} = 2c_{1n}^+ - c_{11}^+. \tag{12}$$

Результаты экспериментов. Выше отмечалось, что в качестве линейки ячеек оптической памяти в плоскости *3* (см. рис. 1) может быть использована голографическая память. Применение такой памяти по сравнению с линзорастровой позволяет упростить оптическую систему. Вместе с тем возникает проблема равномерности распределения яркости в изображении, восстановленном из голограммы. Сказывается нелинейность регистрации [6], «косметический шум» [7, 8] и т. д. Для уменьшения динамического диапазона интенсивности регистрируемых на голограммах интерференционных картин и устранения «косметического шума» в экспериментах был применен рассеиватель, который помещался в плоскости транспарантов с изображениями, регистрируемыми в голограммах в процессе формирования линеек памяти. Применение рассеивателя приводит к тому, что в результате частотных ограничений в плоскости голограмм в восстановленном изображении появляется зернистая структура («спекл-шум») [8]. Нетрудно показать, что результат приведенных выше выкладок в этом случае справедлив при выполнении условия

$$\Delta x \gg l;\ \Delta y \gg l, \tag{13}$$

где l — характерный размер зерна «спекл-шума», Δx, Δy — линейные размеры элемента разрешения. Выполнение условия (13) приводит к усреднению «спекл-шума» на элементе разрешения. Размеры голо-

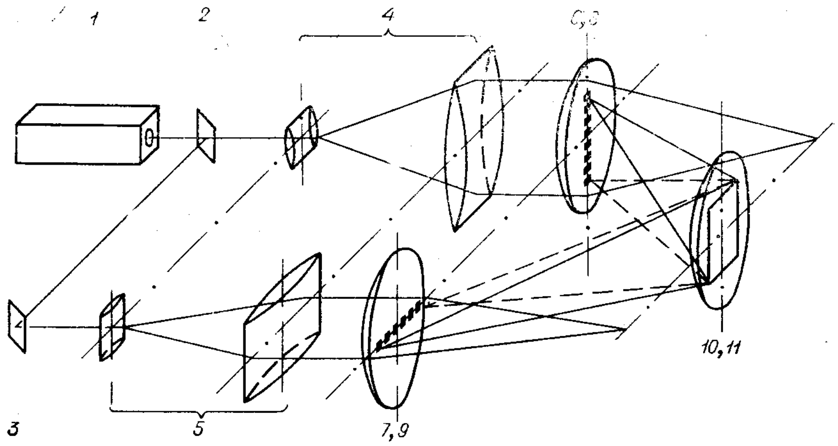

Рис. 4.

грамм $u_г$ и $v_г$ определяются при учете выражения (13), исходя из условия зависимости характерного размера зерна «спекл-шума» от размера голограммы [8]. При формировании линеек голографической памяти была использована традиционная схема безлинзовой Фурье-голографии, полезными свойствами которой являются возможность восстановления двух действительных изображений и нечувствительность положения восстановленного изображения к смещениям голограммы. Первое свойство позволяет в одной оптической системе получать и горизонтальную линейку голограмм, из которой изображения в процессе формирования кодирующей пластины необходимо восстанавливать в $+1$ порядок дифракции, и вертикальную, из которой изображение необходимо восстанавливать в -1 порядок дифракции. Второе свойство позволяет записывать линейку голограмм путем последовательных смещений фотопластинки и затем при освещении ее сходящейся световой волной получать все изображения совмещенными. Были записаны две линейки по 8 голограмм, содержащие положительные части одномерных соответственно по x и y функций Уолша. Размеры голограмм $0{,}5\times0{,}5$ мм, шаг 1,5 мм.

На рис. 4 приведена схема оптической системы, в которой была получена кодирующая пластина, содержащая 64 двумерные функции Уолша. На рисунке *1* — лазер; *2* — светоделитель; *3* — зеркало; *4*, *5* — одномерные коллиматоры, концентрирующие световую энергию на линейках голограмм *6* и *7*; *8*, *9* — объективы, расположенные в плоскости

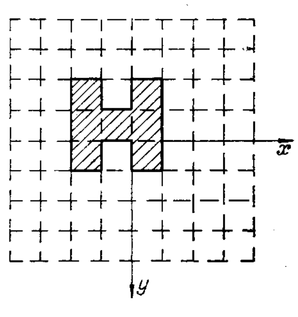

Рис. 5.

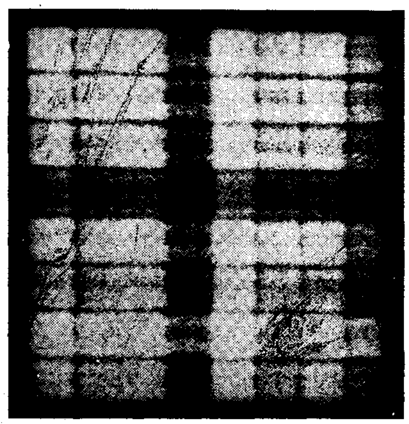

Рис. 6.

c_{11}	c_{21}	c_{31}	c_{41}	c_{51}	c_{61}	c_{71}	c_{81}
1	—0,43	0,43	—1	—0,143	—0,43	0,43	1
1	—0,483	0,43	—0,842	—0,092	—0,315	0,38	0,92

линеек голограмм и образующие сходящиеся световые волны; *10* — объектив с фокусным расстоянием, равным фокусному расстоянию объективов *8* и *9*, расположенный в плоскости кодирующей пластины *11* и формирующий набор плоских волн.

Луч лазера *1* светотделителем *2* направляется в два канала. Коллиматоры *4*, *5* расширяют луч и создают узкие плоские световые фронты, которые освещают линейки голограмм. Объективами *8*, *9* в их задней фокальной плоскости формируются действительные изображения. Совмещение изображений, восстановленных из голограмм одной линейки, происходит автоматически, а изображения, восстановленные из двух линеек, совмещаются перемещением канала, состоящего из элементов *3*, *5*, *7*, *9*, в плоскости, перпендикулярной оси системы.

Проведен анализ тесного двухградационного изображения (рис. 5) с использованием кодирующей пластины, содержащей 64 изображения положительных частей функций разложения. Изображение матрицы коэффициентов показано на рис. 6.

В процессе анализа проводилась нормировка коэффициентов. Необходимость в этом вызвана главным образом разбросом по интенсивности восстанавливаемых изображений функций разложения. Поэтому вначале вычислялось отношение измеренного значения компоненты c_{kn}^{+} (f) при наличии анализируемого изображения к значению этой же спектральной компоненты $c_{kn}^{+}(0)$, полученной при отсутствии изображения, т. е. $\bar{c}_{kn}^{+} = c_{kn}^{+}(f)/c_{kn}^{+}(0)$, затем вычислялось отношение $c_{kn}^{+} = \bar{c}_{kn}^{+}/\bar{c}_{11}^{+}$, где $\bar{c}_{11}^{+}$ — нулевая спектральная компонента. При таком способе нормировки значения спектральных компонент будут нормированы на $\bar{c}_{11}^{+} = \bar{c}_{11}$, а выражения (11), (12) преобразуются к виду

$$c_{kn} = c_{kn}^{+} - c_{k1}^{+} - c_{1n}^{+} + 1;$$

$$c_{k1} = c_{k1}^{+} - 1;$$

$$c_{1n} = c_{1n}^{+} - 1.$$

Результаты измерений и расчетов для первых шестнадцати коэффициентов приведены в таблице. В числителе указаны расчетные, а в знаменателе — измеренные значения коэффициентов.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что погрешность определения спектральных компонент составляет величину порядка 5—7%.

К основным источникам погрешности следует отнести, прежде всего, недостаточное качество изображений, восстанавливаемых из голограмм, несовершенство оптических элементов и погрешность установки исходных изображений в оптической системе.

Заключение. Предложенный метод позволяет за один такт голографической регистрации сформировать базис разложения, состоящий из $N \times N$-функций, и тем самым существенно сократить время изготовления кодирующей пластины.

Экспериментальные исследования подтверждают возможность практической реализации метода.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность Е. Ф. Пену за помощь при проведении экспериментов.

c_{12}	c_{22}	c_{32}	c_{42}	c_{52}	c_{62}	c_{72}	c_{82}
0,143	−0,143	0,143	−0,143	0,143	−0,143	0,143	0,143
0,2	−0,089	0,16	−0,15	0,132	−0,25	0,12	0,121

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Гибин, Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Когерентно-оптические устройства для обобщенного спектрального анализа изображений.— «Автометрия», 1972, № 5.
2. Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Линейные оптические системы для выполнения интегральных преобразований общего вида.— «Автометрия», 1972, № 6.
3. Хармут. Применение функций Уолша в теории связи.— «Зарубежная радиоэлектроника», 1971, № 8.
4. С. Бесветтер. Анализ и синтез сигналов с помощью функций Уолша.— «Зарубежная радиоэлектроника», 1972, № 5.
5. В. П. Логинов. Функции Уолша и области их применения.— «Зарубежная радиоэлектроника», 1973, № 4.
6. A. Kozma. Analysis of the Film Non-Linearities in Hologram Recording.— "Optica Acta", 1968, v. 15, № 6.
7. E. Leith, J. Upatnieks. Wave Front Reconstruction with Continuous Tone Objects.— "J. Opt. Soc. America", 1963, v. 53, p. 1377.
8. Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. Оптическая голография. М., «Мир», 1973.

Поступила в редакцию 26 декабря 1974 г.

УДК 772.99 : 621.391.156

Г. И. ВАСИЛЕНКО, А. Д. МАНУИЛЬСКИЙ, Е. С. НЕЖЕВЕНКО, А. И. ТРОЙНИКОВ

(Москва — Новосибирск)

ОПТИМАЛЬНОЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Задача апостериорного восстановления качества изображений относится к широкому классу задач редукции к идеальному прибору [1]. Возможность решения этой задачи на основе применения методов голографии продемонстрирована Дж. Строуком и его сотрудниками [2].

В методах Дж. Строука компенсация несовершенства некоторого прибора как линейной системы с передаточной функцией $H(\vec{\omega})$, достигается путем применения инверсного фильтра, имеющего передаточную функцию $1/H(\vec{\omega})$. Эта функция реализуется при помощи двух транспарантов-фильтров, один из которых представляет амплитудную часть функции и изготавливается фотографическим способом, а другой — фазовую часть и получается голографическим способом. Такая фильтрация имеет ряд принципиальных недостатков, обусловленных тем, что в тех точках частотной плоскости, где $H(\vec{\omega})=0$, передаточная функция не определена, а неизбежное присутствие шума в восстановленном изображении приводит к тому, что решение интегрального уравнения, дающее передаточную функцию инверсного фильтра, оказывается неустойчивым также в окрестностях точек, в которых $H(\vec{\omega})=0$. Эти особенности инверсной фильтрации приводят к тому, что несмотря на преодоле-