

лежат лицам пациентов, подверженных типичному паталогическому отклонению. Применение голографического метода усреднения позволяет определить общие особенности в лицах одного и того же ряда. Ниже показано усредненное изображение, характеризующее кататоническую шизофрению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. Ch. Viénot, J. Duvernoy, G. Tribillon. Problèmes du Traitement Optique de l'Information.—Nlle Rev. d'Optique, 1971, v. 2.
2. J. Bulabois, A. Caron, J. Ch. Viénot. Selectivity of Hologram Filters as a Function of Pass-Band Characteristics.—Opt. Techn., 1969, v. 1.
3. G. Tribillon, J. Ch. Viénot. Discrimination of Optical Signals by Using Random Distributions of Sources in Fourier Holography.—Opt. Comm., 1971, v. 3.
4. J. Ch. Viénot, J. Bulabois, L. R. Guy. Three Dimensional Object Recognition in Real Time by Multiplex Spatial Filtering.—Opt. Comm., 1971, v. 2.
5. R. M. Bracewell. The Fourier Transform and its Applications. Mc. Graw—Hill, 1965.
6. Y. W. Lee. Statistical Theory of Communication. John Wiley & Sons, Inc., 1966.
7. S. C. Som. Multiple Reproduction by Sampling.—J. O. S. A., 1970, v. 60.
8. D. Dammann, K. Görtler. High-Efficiency in Line Multiple Imaging by Means of Multiple Phase Holograms.—Opt. Comm., 1971, v. 3.
9. L. B. Lesem, P. M. Hirsch, J. A. Jordan. The Kinoform: a New Wavefront Reconstruction Device, I. B. M.—J. Res. Develop., 1969, v. 13.
10. J. E. Rau. Detection of Differencies in Real Distribution.—J. O. S. A., 1966, v. 56.

Поступила в редакцию 14 мая 1973 г.

УДК 621.378 : 682.332

О. И. ПОТАТУРКИН, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ

(Новосибирск)

### СИНТЕЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Ранее сообщалось, что некоторые из когерентно-оптических устройств, осуществляющих обобщенный спектральный анализ изображений, пригодны для восстановления (синтеза) исходных изображений, если известны спектральные компоненты и система функций разложения [1].

Однако при этом не обсуждались вопросы, непосредственно связанные с процессом восстановления. Этому посвящена настоящая работа, где рассмотрены методы моделирования знакопеременных спектральных компонент и функций разложения, а также описана принципиальная схема оптической системы для синтеза изображений. Последняя относится к классу линейных оптических систем с импульсной реакцией общего вида [2]. Возможность восстановления изображений в такой системе подтверждена экспериментально.

**Метод синтеза.** Метод восстановления изображения  $f(x, y)$  вытекает непосредственно из соотношения

$$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k a_{ij} \varphi_{ij}(x, y) = f(x, y), \quad (1)$$

где  $a_{ij}$  — коэффициенты (спектральные компоненты);  $\{\varphi_{ij}(x, y)\}$  — ортонормированная система функций разложения. Согласно (1), функции  $\varphi_{ij}(x, y)$ , задаваемые амплитудным распределением световой волны, должны быть воспроизведены в одном и том же месте плоскости  $(x, y)$  и алгебраически суммированы в этой плоскости с весами, равными значениям спектральных компонент. Результирующая функция  $f(x, y)$  также описывает амплитудное распределение световой волны.

При реализации этого метода в когерентно-оптических системах должны быть определены способы задания, регистрации и восстановле-

ния функций разложения, которые в общем случае являются знакопеременными, а также способы задания абсолютных значений спектральных компонент и их знаков.

Функции принятой системы можно моделировать соответствующими амплитудно-фазовыми распределениями световых волн и регистрировать эти распределения голографическим способом либо на одном участке фотосреды, либо на ее различных участках в виде матрицы голограмм. Поскольку в первом случае с увеличением числа регистрируемых функций ухудшается соотношение сигнал/шум в восстановленном изображении, более предпочтительным оказывается второй способ записи, выполняемый так, что считываемые с голограмм матрицы функции разложения восстанавливаются в одном и том же месте плоскости наблюдения.

Знак функций можно задавать следующими способами:

а) сдвигом фазы волны на тех участках ее амплитудного фронта, которые соответствуют отрицательным значениям функций разложения; в этом случае в сигнальный пучок при записи помещаются полуволновые фазосдвигающие элементы необходимой конфигурации;

б) последовательной во времени записью положительной и отрицательной частей на одном участке фотосреды; при этом фазосдвигающий элемент (например, интерферометр Жамена) помещается в опорный пучок;

в) преобразованием знакопеременных функций разложения в положительные путем добавления постоянной составляющей.

Наиболее простым является третий способ, однако в этом случае ухудшается контраст синтезированных изображений, поскольку они воспроизводятся также на фоне постоянной составляющей. Действительно,

$$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k a_{ij} [\varphi_{ij}(x, y) + c] = f(x, y) + c \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k a_{ij}, \quad (2)$$

где  $c = \max |\varphi_{ij}^-(x, y)|$  — постоянная составляющая, равная наибольшему модулю из отрицательных значений функций разложения.

Можно, правда, показать, что для некоторых ортонормированных систем функций, удовлетворяющих условию, которое будет приведено ниже, постоянная составляющая в (2) обращается в нуль. Для этого рассмотрим сумму

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k a_{ij} &= \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \iint_{\Omega} f(x, y) \varphi_{ij}(x, y) dx dy = \\ &= \iint_{\Omega} f(x, y) \left[ \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \varphi_{ij}(x, y) \right] dx dy. \end{aligned} \quad (3)$$

Если принять, что  $\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \varphi_{ij}(x, y) = g(x, y)$ , то, умножая обе части равенства на  $\varphi_{ij}(x, y)$  и интегрируя по обоим переменным, находим

$$1 = \iint_{\Omega} g(x, y) \varphi_{ij}(x, y) dx dy.$$

Отсюда следует, что для некоторых систем функций (например, Уолша, косинусоидальной и др.)

$$g(x, y) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \varphi_{ij}(x, y) = \delta(x, y), \quad (4)$$

где  $\delta(x, y)$  — дельта-функция Дирака. Подставляя (4) в (3), получаем

$$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k a_{ij} = \iint_{\Omega} f(x, y) \delta(x, y) dx dy = f(0, 0).$$

Таким образом, если система функции разложения удовлетворяет условию (4), то для синтезированных изображений, значения которых в начале координат равны нулю, постоянная составляющая отсутствует и их контраст не ухудшается.

Абсолютные значения спектральных компонент можно задавать путем модуляции амплитуды света жидкокристаллическими, электрооптическими и другими типами модуляторов. Эффект модуляции достигается также путем изменения площади голограмм, у которых информационный вклад каждого элемента площади одинаков. Это имеет место тогда, когда голографическая запись производится при диффузном освещении функций разложения  $\varphi_{ij}(x, y)$ .

Если  $S$  — полная площадь голограммы, то изменение ее на  $S_{ij}$  приводит к изменению светового потока, а следовательно, и интенсивности восстановленного изображения в  $S_{ij}/S$  раз. При модуляции амплитуды световой волны изменение площади должно быть пропорционально квадрату значений спектральных компонент, т. е.  $a_{ij} = \sqrt{S_{ij}/S}$ . Изменяя таким же образом площади остальных голограмм матрицы и восстанавливая изображение функций в одном и том же месте плоскости наблюдения с точностью до фазового множителя, получим

$$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \sqrt{S_{ij}/S} \varphi_{ij}(x, y) = f(x, y).$$

Хотя такой способ модуляции и приводит к появлению зернистости в результирующем изображении, он позволяет контролировать и учитывать неизбежный для голограмм разброс по интенсивностям восстановленных изображений функций разложения.

Отрицательные значения спектральных компонент можно получать путем введения в восстанавливающий пучок решетки управляемых фазосдвигающих (на  $\pi$ ) элементов. Более удобен, однако, другой способ. Каждая из функций  $\varphi_{ij}(x, y)$  на одной голограмме регистрируется в виде  $\varphi_{ij}(x, y)$ , на второй — в виде  $-\varphi_{ij}(x, y)$ . В процессе синтеза в зависимости от знака спектральной компоненты освещается одна из голограмм. В этом случае синтезированное изображение будет формироваться в соответствии с выражением

$$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k |a_{ij}| (-1)^{P_{ij}(f)} \varphi_{ij}(x, y) = f(x, y), \quad (5)$$

где  $P_{ij}(f)$  принимает значения 0 или 1 для фиксированных  $i$  и  $j$ .

**Система синтеза.** Принципиальная схема оптической системы для синтеза изображений выделена на рис. 1 штриховой линией. На схеме: 6, 7 — плоские монохроматические световые волны; 8 — матовая пластина; 9 — транспарант с функцией разложения; 10, 13 — объективы, составляющие телескопическую систему; 11 — модулятор; 12 — матрица голограмм; 14 — выходная плоскость, проективно сопряженная с плоскостью 9. Остальная часть

схемы служит для получения сигнальной и опорной плоских монохроматических волн, где 1 — лазер; 2 — коллиматор; 3 и 5 — зеркала; 4 — светоделительная пластина.

Допустим, что функция разложения задана на фоне постоянной

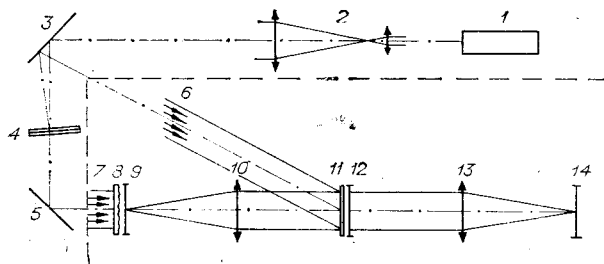


Рис. 1.

составляющей, что каждая из них записана при диффузном освещении на двух голограммах соответственно в виде  $\varphi_{ij}(x, y)$  и  $-\varphi_{ij}(x, y)$  и что значения спектральных компонент задаются путем пропорционального изменения площади голограмм.

В процессе записи матрицы голограмм модулятор 11 отсутствует, а в его плоскости помещается неподвижная диафрагма. Транспаранты с изображениями функций разложения вводятся в оптическую систему поочередно, а фотопластина 12 после каждой экспозиции сдвигается на размер голограммы. Матовая поверхность пластины 8 обеспечивает диффузное освещение транспаранта.

Амплитудное пропускание произвольной Фурье-голограммы пропорционально

$$\begin{aligned} \sum_{m,n} F \left[ \{(-1)^{P_{ij}\varphi_{ij}^{mn}} + c\} e^{-i\psi_{mn}} \delta(x - x_m) \delta(y - y_n) \right] e^{i(\alpha u + \beta v)} = \\ = \sum_{m,n} \{(-1)^{P_{ij}\varphi_{ij}^{mn}} + c\} e^{-i\psi_{mn}} e^{-i(x_m u + y_n v)} e^{i(\alpha u + \beta v)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — константы, характеризующие угол наклона волны 6 (опорной) относительно волны 7 (сигнальной) в соответствующих плоскостях;  $u = \frac{2\pi\xi}{\lambda f}$ ;  $v = \frac{2\pi\eta}{\lambda f}$ ;  $\lambda$  — длина волны света;  $f$  — фокусное расстояние объектива, выполняющего преобразование Фурье;  $\xi$  и  $\eta$  — пространственные координаты в плоскости голограммы;  $\psi(x, y) = \sum_{m,n} \psi_{mn} \delta(x - x_m) \delta(y - y_n)$  — функция, описывающая поверхность матовой пластины.

В процессе синтеза волна 7 перекрывается, а перед матрицей голограмм помещается модулятор в виде решетки диафрагм, имеющих различную площадь. Тогда, принимая во внимание (6), в плоскости 14 имеем

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \sum_{m,n} F^{-1} \left[ \{(-1)^{P_{ij}\varphi_{ij}^{mn}} + c\} \sqrt{\frac{S_{ij}}{S}} e^{i\psi_{mn}} e^{-i(x_m u + y_n v)} \right] = \\ = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \sum_{m,n} \sqrt{\frac{S_{ij}}{S}} \{(-1)^{P_{ij}\varphi_{ij}^{mn}} + c\} \delta(x - x_m) \delta(y - y_n) = \\ = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \left\{ \sqrt{\frac{S_{ij}}{S}} (-1)^{P_{ij}\varphi_{ij}(x, y)} + c \sqrt{\frac{S_{ij}}{S}} \right\} e^{-i\psi(x, y)} = \\ = \left\{ f(x, y) + c \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \sqrt{\frac{S_{ij}}{S}} \right\} e^{-i\psi(x, y)}, \end{aligned} \quad (7)$$

что с точностью до фазового множителя соответствует синтезируемому изображению, получаемому на фоне постоянной составляющей. При принятом способе задания знаков функций и спектральных компонент эту составляющую исключить нельзя, поскольку она пропорциональна сумме  $\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k |a_{ij}|$ , всегда отличной от нуля. Контраст изображения в этом случае определяется выражением

$$\gamma = \frac{\bar{f}(x, y)}{\bar{f}(x, y) + c \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k |a_{ij}|},$$

где  $\bar{f}(x, y)$  — среднее значение функции  $f(x, y)$ .

Отметим, что в реальной оптической системе пределы интегрирования ограничены апертурой диафрагм и отличны от бесконечных, поэтому вместо  $\delta$ -функции в (7) будем получать функции вида  $\text{sinc}\left(\frac{2\pi a}{\lambda f} x\right)$ ,

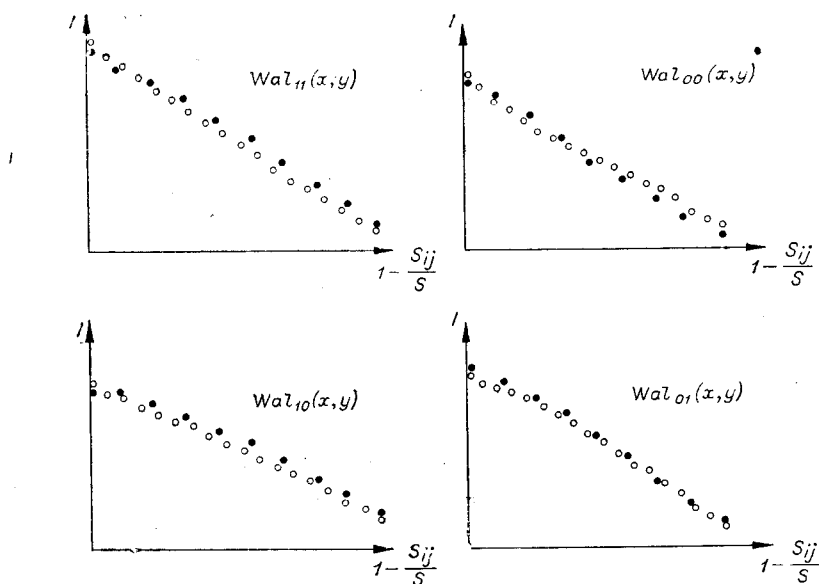


Рис. 2.

$\text{sinc}\left(\frac{2\pi b}{\lambda f} y\right)$ , где  $a$  и  $b$  — линейные размеры апертуры. В этом случае наибольшие искажения будут претерпевать те из высокочастотных функций разложения, которые восстанавливаются с голограмм, имеющих малые размеры апертур.

**Результаты экспериментов.** Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. В качестве функций разложения использована система функций Уолша, принимающих два значения и хорошо моделируемых двухградационными изображениями.

Вначале проверялась равномерность распределения интенсивности света в плоскости голограммы при диффузном освещении транспаранта. Для этого опорная волна 6 перекрывалась, вместо модулятора 11 помещалась диафрагма, матрица голограмм 12 отсутствовала, а в плоскости 14 помещался фотоприемник, с помощью которого измерялись значения светового потока при различных площадях диафрагмы. На графиках рис. 2 эта зависимость для четырех различных функций Уолша отмечена кружками. Видно, что она близка к линейной.

Далее оценивалось влияние на эту зависимость процесса голографической регистрации функций разложения. После получения голограмм сигнальная волна 7 перекрывалась, в плоскости 11 помещалась диафрагма, а в плоскости 14 — фотоприемник. Зависимость между изменением площади голограмм и изменением выходного светового потока для тех же функций Уолша отмечена на графиках рис. 2 точками. Видно, что отклонение этой зависимости от линейной имеет тот же порядок (1—2%), что и в случае непосредственного проецирования функций из плоскости 9 в плоскость 14.

Для синтеза изображений использовано 64 двумерных функций Уолша первых четырех порядков, которые были зарегистрированы в 127 (64+63) голограммах матрицы. В процессе синтеза сигнальный пучок 7 в схеме на рис. 1 перекрывался, а в плоскости 11 перед матрицей голограмм помещался транспарант с диафрагмами, площадь которых пропорциональна значениям спектральных компонент, полученных ранее при разложении синтезируемых изображений по функциям Уолша. На рис. 3 показаны синтезированные экспериментальным путем изображения начальных букв русского и латинского слова «голография» (контраст  $\gamma$  этих изображений равен соответственно 0,625 и 0,611).

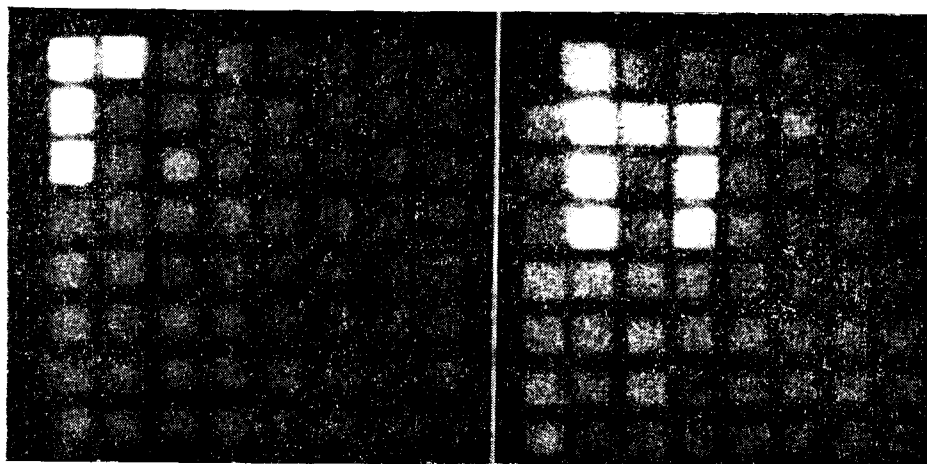


Рис. 3.

**Заключение.** Трудности синтеза изображений обусловлены в основном трудностями представления значений и знаков спектральных компонент. Поэтому принятый нами путь синтеза — в настоящее время один из немногих, допускающих физическое моделирование. К числу его недостатков следует отнести необходимость применения транспарантов с решеткой диафрагм, невысокий контраст синтезированных изображений и возможность появления шумов зернистости. Устранение этих недостатков может быть достигнуто при использовании новых технически реализуемых принципов амплитудно-фазовой модуляции световых пучков.

Авторы выражают свою признательность Е. Ф. Пену за помощь при проведении эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Гибин, Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Когерентно-оптические устройства для обобщенного спектрального анализа изображений.— *Автоматрия*, 1972, № 5.
2. Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Линейные оптические системы для выполнения интегральных преобразований общего вида.— *Автоматрия*, 1972, № 6.

*Поступила в редакцию 11 мая 1973 г.*

УДК 621.391.156

**А. С. БЛОК, О. М. ЗЮЗИН,  
Э. И. КРУПИЦКИЙ, Г. Х. ФРИДМАН**  
(Ленинград, Москва)

### ГИБРИДНЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ \*

Главная особенность задачи распознавания зрительных образов — многомерность объекта распознавания. В самом общем случае зрительный образ является четырехмерным (три пространственные координаты и одна временная). В простейшем случае плоского, постоянного во време-

\* Материал доложен на 5-й Всесоюзной школе по физическим основам голографии, проходившей с 29 января по 3 февраля 1973 года в г. Новосибирске.