

## ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

© Applied Optics, 1973.

УДК 621.375.1:681.33

Ж.-Ш. ВЬЕНО  
(Безансон)

### АНАЛОГОВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ \*

При решении проблемы оптической обработки информации стремятся к сокращению числа операций, которые необходимо произвести над объектом. Для экономии на любой стадии обработки следует учитывать возможности оптических операционных элементов (например, емкость памяти). Большое значение имеет выбор главных особенностей сообщения и его спектра для того, чтобы найти способы сжатия информации и увеличения емкости памяти.

**Определение границ полосы пропускания системы.** На рис. 1, *a* иллюстрируется совершенно интуитивный факт — описание любого объекта не требует знания его полного спектра. Изображение объекта можно получить, используя только часть спектра. В результате сокращается ширина полосы в плоскости Фурье. На рисунке показана фотография псевдослучайной решетки (*a*) (иногда используемой в качестве источника в спектрометрах) и ее дифракционный спектр (*b*). Из рисунка видно, что спектр имеет узкие полосы.

Фотометрический профиль спектра  $I(u)$  можно рассматривать как суперпозицию двух распределений  $R(u)$  и  $C(u)$ . Компонента  $R(u)$  соответствует главной периодичности, а  $C(u)$  — отклонению от нее, иначе говоря,  $R(u)$  характеризует избыточность по отношению к заданной, специфической информации  $C(u)$ .

Это обстоятельство используют следующим образом: например, записывают Фурье-голограмму текста страницы книги с опорным источ-

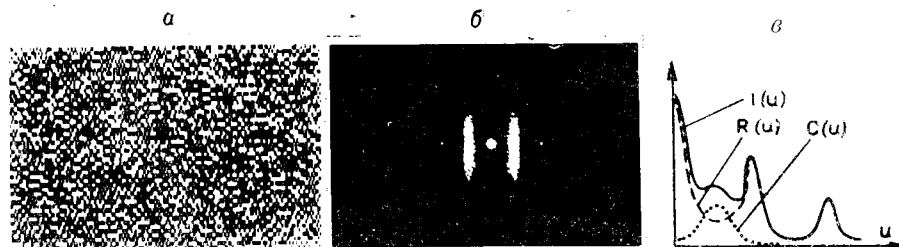


Рис. 1.

ником, имеющим псевдослучайное распределение, показанное на рис. 1, *a*. Спектр сообщения будет иметь узкие границы, сжатые в одну боковую полосу. Эти границы определяют код сообщения. При восстановлении

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

выделенная часть спектра воспроизводит текст полностью и с хорошим контрастом.

**Геометрическое сжатие информации.** Существование боковых полос в спектре, подобных распределению  $C(u)$  на рис. 1, а, аналогично сжатию информации и предполагает обязательную модуляцию спектра опорным лучком (несущей) в узких областях, расположенных вблизи центра дифракционной плоскости (например, плоскость голограммы).

На рис. 2 показана анаморфотная система, которая позволяет сжать информацию в одном направлении. Если ось цилиндрической линзы установлена по направлению  $y$  и плоскость Фурье  $I(u)$  является геометрически сопряженной, то вся информация, заключенная в апертуре  $(x, y)$ , концентрируется вдоль линий  $y'$ . Следовательно, в окрестности  $y'$  информация сжата.

Предположим, что тест-объект совпадает с апертурой  $(x, y)$ . Тогда в плоскости  $I(u)$  можно записать Фурье-голограмму. На рис. 3 пред-

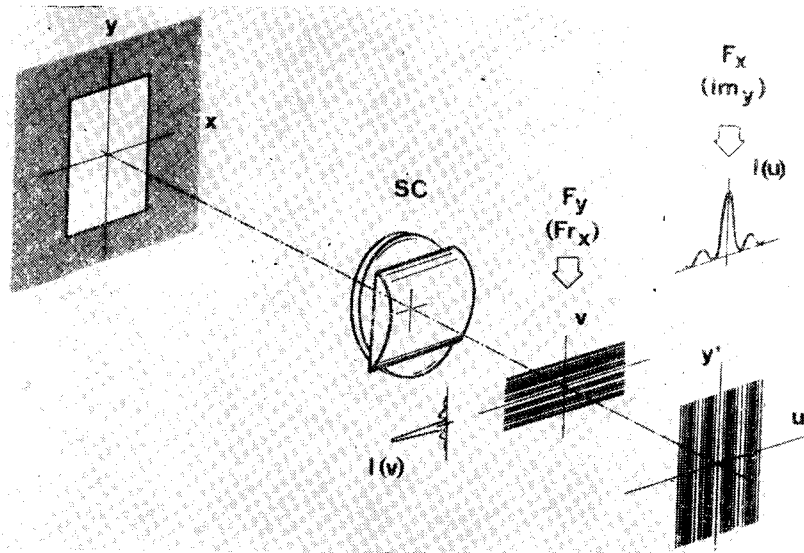


Рис. 2.

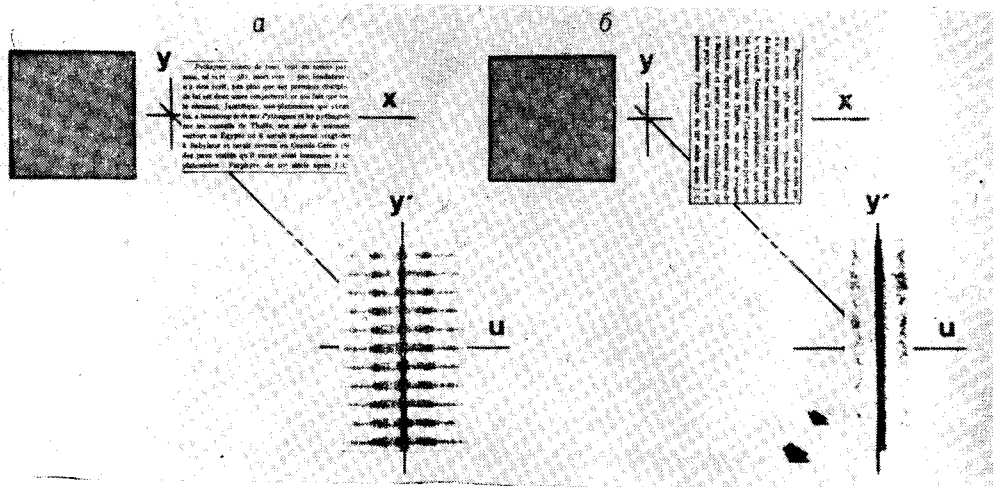


Рис. 3.

лагаемый способ сжатия иллюстрируется на примере текстов страницы книги. В первом случае (см. рис. 3, *a*) линии текста ортогональны оси  $y'$  и в плоскости спектра опорный пучок модулирует малую площадь, сжатую по направлению  $y'$ . Объем информации, записанный на такой голограмме, не может быть большим, и восстановленное изображение имеет плохое качество.

На рис. 3, *b* положение более благоприятное, так как анаморфотный объектив работает как одномерный Фурье-преобразователь ( $x \rightarrow u$ ) и идеальная изображающая система ( $y \rightarrow y'$ ). По сравнению с первым случаем информация в спектральной плоскости занимает меньшую площадь светочувствительной поверхности пластинки, причем такое сжатие не приводит к потерям в тексте при восстановлении. Здесь центр тяжести переносится на «информативную емкость» опорного пучка. Это особенно важно при кодировании сообщения: для заданной информативной емкости наилучшее кодирование связано с оптимизацией накопленной информации и, в свою очередь, зависит от максимальной дифракционной эффективности [1—4].

**Согласование сигнала и опорного пучка.** Спектр сигнала может сильно изменяться от одного сообщения к другому, поэтому рассмотренный выше способ обработки информации будет приводить к потере контраста в восстановленном изображении текста. Определение границы полосы пропускания спектра не следует осуществлять произвольно. Опорный пучок необходимо согласовывать с индивидуальными особенностями сигнала. Например, при обработке страницы текста нужно учитывать весовую функцию каждой буквы, т. е. знать вероятность появления буквы в тексте, которая пропорциональна весовой функции. В соответствии с этим необходимо изменять опорный пучок и изменение учитывать при восстановлении. Для этой цели в голограмме должна быть создана система микрополос индивидуально для каждой буквы в зависимости от частоты появления буквы в тексте. Тогда дифракционная эффективность будет одинакова для всех букв, и изображение всего текста будет восстановлено лучше.

**Мультиплицирование в Фурье-плоскости с помощью амплитудных решеток.** Действие амплитудной решетки для целей мультиплицирования микроструктур [5—7] иллюстрируется рис. 4. Входной сигнал  $f(x)$  расположен перед первой линзой  $L_1$  коррелятора ( $L_1, L_2$ ), осуществляющего двойное дифракционное преобразование. Решетка  $G(u)$  фильтрует спектр  $F(u)$  функции  $f(x)$ . В выходной плоскости наблюдают результат свертки входного сигнала с Фурье-преобразованием решетки. Функция пропускания решетки  $G(u)$  в общем случае комплексная. Проблема может быть решена, когда мультиплицирование осуществляется с помощью амплитудной или фазовой решетки. Далее будет показано, что упомянутые типы решеток дают одинаковые результаты.

Амплитудная решетка  $G(u)$  перекрывает в плоскости спектра области шириной  $\xi$  около точек  $u = nu_0$ . Это приводит к появлению модуляционного члена из-за конечного размера  $\xi$ . Следовательно, нулевой порядок дифракции будет отличаться по интенсивности от внеосевых пучков. При мультиплицировании это большое неудобство, так как в поле зрения размноженные изображения будут иметь разную интенсивность. Переход к фазовой решетке сохраняет свойства мультиплицирования и увеличивает энергию внеосевых изображений.

**Мультиплицирование с помощью бинарных фазовых решеток.** Чернобелую решетку (пропускание  $t=0$  и  $t=1$ ) при смещении оси  $u$  (рис. 5) можно рассматривать как имеющую пропускание ( $t=-1$  и  $t=+1$ ) с фазами 0 и  $\pi$ .

Большинство способов изменения фазы путем изменения толщины прозрачного материала рассмотрено в [8—9]. Наш аналоговый метод моделирует фазовую решетку (см. рис. 5) в виде шахматной доски, клет-

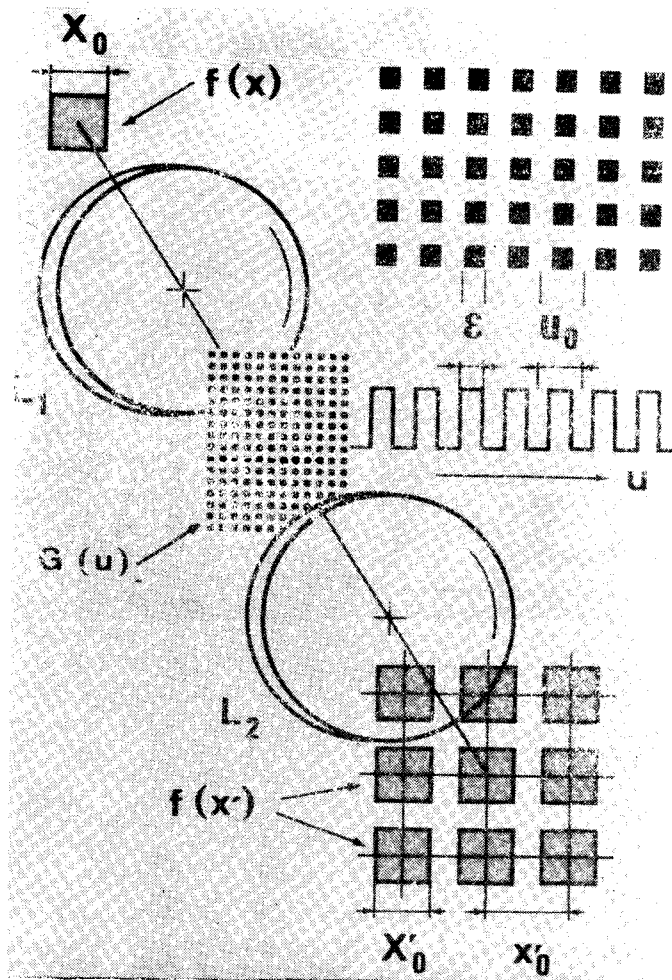


Рис. 4.

ки которой разделены рядом темных непрозрачных полос. Каждый ряд смещен на половину периода относительно соседнего (требуется точное смещение). Результат действия решетки — переналожение двух картин; первая из них соответствует действию ансамбля линий, вторая — периодическому распределению элементов шахматной доски. Так как решетка моделирует нечетную функцию  $G'(u)$ , то центральный член ряда Фурье равен нулю. Знак фазы в решетке попеременно меняется вдоль обоих ортогональных направлений. Следовательно, энергия равна нулю в тех местах, где фазовые компоненты имеют противоположные знаки. Изображения, расположенные в соответствующих местах выходной плоскости, исчезают. Наблюдаются четыре изображения диагоналей. Интенсивности изображений равны.

В модели решетки  $0 - \pi$  центральные изображения имеют меньшую интенсивность, чем интенсивность нулевого порядка. Перераспределение энергии можно достигнуть с решеткой в виде шахматной доски с клетками неодинаковой ширины. Например, решетка, показанная на рис. 6, позволяет получить девять изображений, интенсивности которых почти равны. Число изображений возрастает, когда период решетки  $G_n(u)$  уменьшается; при этом повышается ее разрешение.

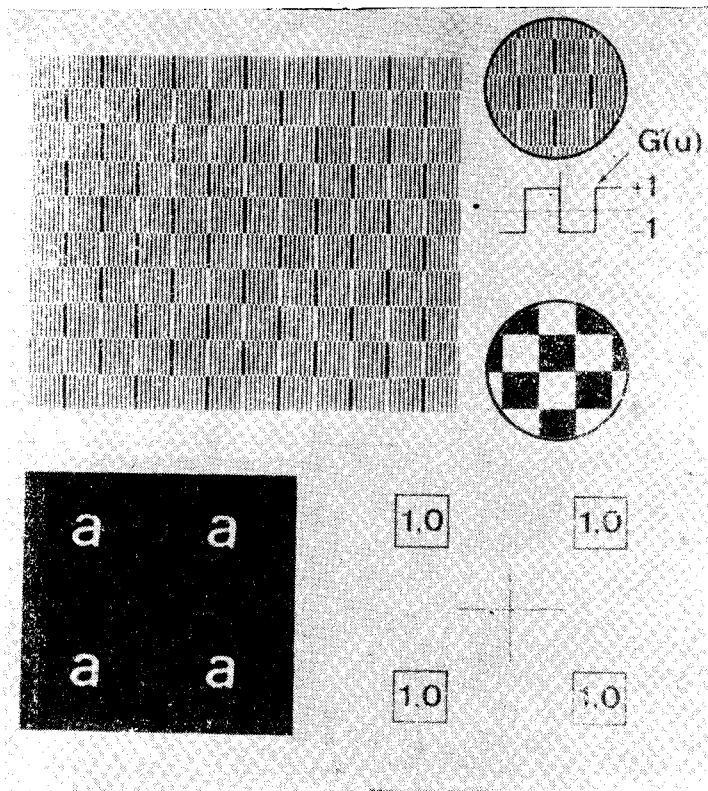


Рис. 5

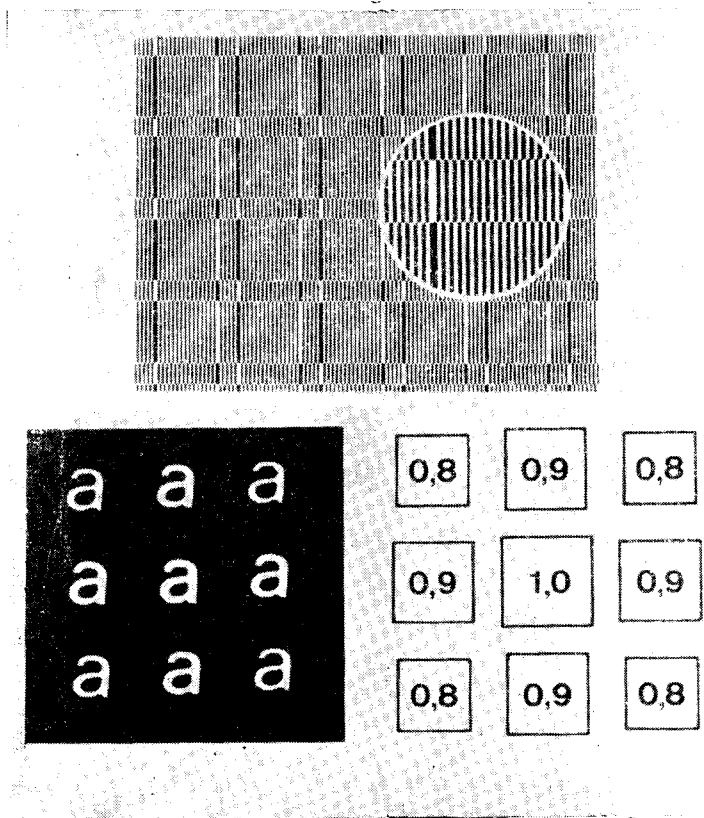


Рис. 6.

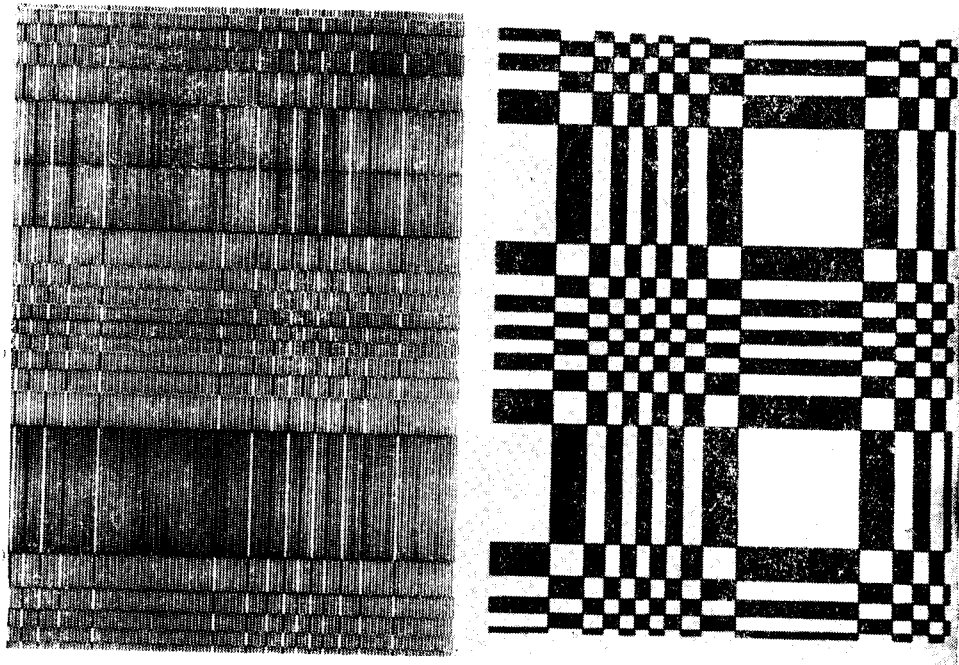


Рис. 7.

Более сложная решетка с отверстиями разного размера показана на рис. 7. Конфигурация решетки рассчитана при помощи ЭВМ. Она позволяет согласовать разрешение и интенсивности размноженных изображений: это достигается различной высотой штрихов, причем в каждом ряду расстояния между штрихами разные. У такой решетки фаза меняется постепенно.

**Усредненная обработка.** Когда элементы группы сигналов подобны по форме и структуре, часто стремятся найти некоторый средний сигнал. Например, серия портретов, рукописные буквы в тексте и т. п. имеют характерные общие части (крючки, каракули, линии), которые повторяются от сигнала к сигналу. В любом случае получение средней геометрической формы возможно через усредненный спектр данного класса сигналов.

Предлагаемый метод позволяет одновременно геометрически совместить входные сигналы и их пространственные спектры. Для дальнейшей обработки используется усредненная голограмма Фурье. В итоге в одном эксперименте из класса предъявленных сигналов можно получить усредненный сигнал и его усредненный Фурье-спектр. Это осуществляется на установке, схема которой показана на рис. 8. Входной сигнал составляют из Фурье-спектров отдельных сигналов, записанных на фотоматериале. Выходной сигнал определяется как усредненный модуль спектра. Естественно, что сигнал содержится в автокорреляционной

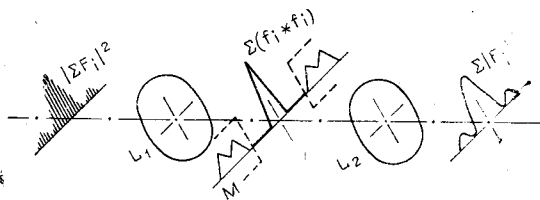


Рис. 8.

функции  $f_i * f_i$ . Геофизики используют подобные способы для определения главных периодичностей сейсмических сигналов [10].

Наш способ обработки отличается от известных заключается в том, что к входному сигналу подвешивается опорный источник:

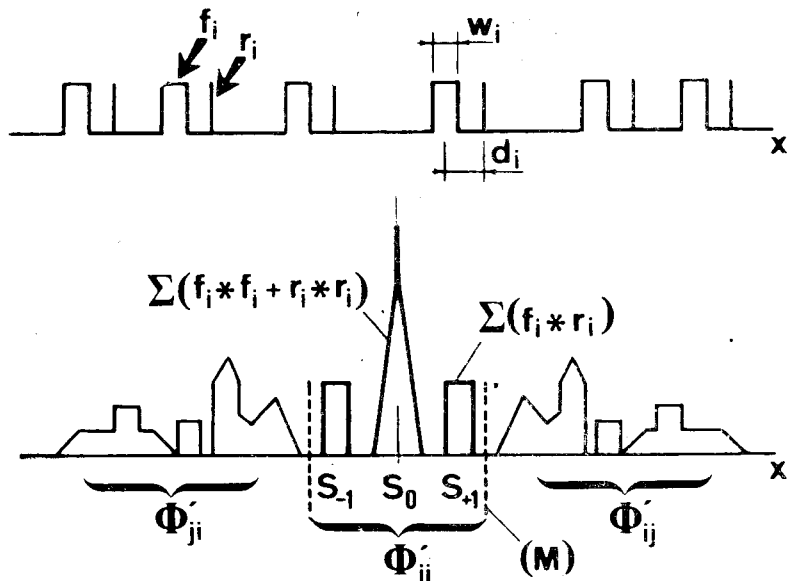


Рис. 9.

такой голографический способ обработки не только способствует получению автокорреляционной функции сигнала в промежуточной плоскости, но также позволяет вычислить функцию взаимной корреляции между сигналом и опорным источником. Причем последняя может быть выделена и отфильтрована. В итоге усредненные Фурье-голограммы наблюдаются в выходной плоскости.

Действительно, во входном сигнале сумму Фурье-спектров заменим суммой Фурье-голограмм, образованных парами  $f_i + r_i$ , где  $r_i$  — опорный источник, а  $f_i$  — обрабатываемый сигнал (рис. 9). При обработке составляющую  $\Phi'_{ij} + \Phi'_{ji}$  можно отфильтровать, так как в Фурье-плоскости она не перекрывается с центральными составляющими, сконцентрированными около оптической оси.

На участке  $S_0$  находится автокорреляционная функция  $\Phi_{ii}$   $n$  раз размноженного сигнала  $f_i$ . В дифракционных порядках  $S_{-1}$  и  $S_{+1}$  суммируются без каких-либо искажений все сигналы  $f_i$ , так как они образуются путем свертки с опорными источниками  $r_i$  (импульсы Дирака), а расстояния  $d_i$  между различными  $f_i$  и  $z_i$  равны. Причем в первом порядке дифракции  $S_{+1}$  будет наблюдаться усредненное изображение

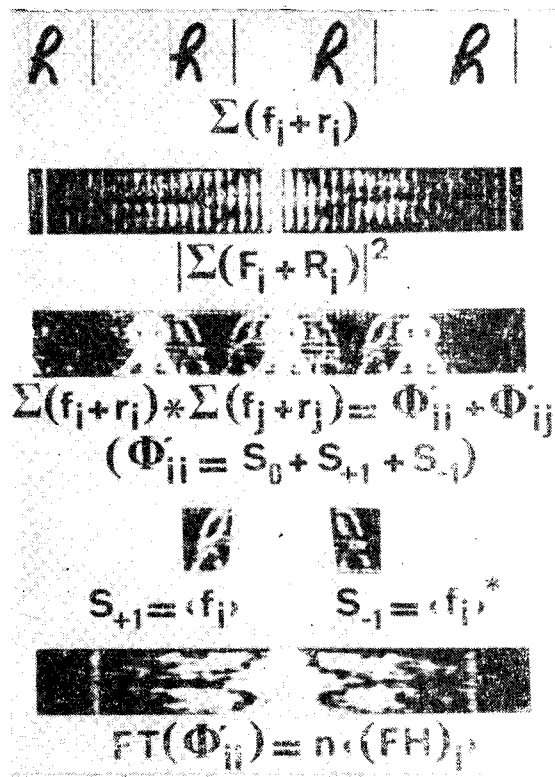


Рис. 10.



Рис. 11.

ненной Фурье-голограммы  $\langle (FH_i) \rangle$ , существенно зависит от положения опорных пучков  $r_i$ . Разрешение в изображении сильно связано с пространственной частотой интерференционной картины  $(f_i, r_i)$ , которая является несущей частотой объекта информации. Основная частота несущей определяется расстоянием  $d_i$  между опорным источником и осью сигнала;  $d_i$  должно быть больше, чем основная частота объекта. Это означает, что метод применим в тех случаях, когда элементы (сигналы) на прозрачном отстоят на достаточном расстоянии друг от друга. Между соседними сигналами необходимо найти место для опорного источника. Если расстояние не является достаточным, то выполнить это условие можно произвольным сдвигом сигналов. Сдвиг сигналов не влияет на объем информации и структуру голограммы, которая остается неизменной при любом перемещении элементарных пар  $(f_i, r_i)$ .

**Экспериментальные результаты.** На рис. 10 показан процесс получения усредненного значения буквы  $h$  по четырем образцам разного написания. Около каждой буквы имеется вертикальная черта, моделирующая опорный источник  $r_i$  (функция Дирака). Такое расположение букв и опорных источников хорошо подходит для обработки анаморфотной системой, приведенной выше. В результате наблюдается усредненный контур буквы и ее усредненный спектр Фурье.

Аналогичная техника применялась при оценке физиологических тестов Szondi, состоящих из 48 портретов, по шесть в каждом ряду. На рис. 11 показана только часть серии. Портреты в одном ряду принад-

исходного транспаранта, а в  $S_{-1}$  — его зеркальное отображение.

**Усредненные Фурье-голограммы.** При дальнейшей обработке дифракционные порядки  $\Phi_{jj}$  выделяются щелью (см. рис. 9). В результате вторичного преобразования Фурье в выходной плоскости наблюдается усредненная Фурье-голограмма входного сигнала.

В этой голограмме хранится усредненное изображение сигнала, которое предварительно наблюдается в Фурье-плоскости коррелятора. С усредненной информацией, полученной от суммы сигналов, можно проводить операции сравнения и детектирования. Следует отметить тот факт, что качество изображения сигнала, восстановленного из усред-



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-